

Казахский национальный университет имени аль-Фараби

УДК 533.9.01

На правах рукописи

ДЖУМАГУЛОВ МУРАТ НУРМАНОВИЧ

**Диагностика, структурные и динамические свойства пылевой плазмы
высокочастотного разряда**

6D060400-Физика

Диссертация на соискание ученой степени
доктора философии (PhD)

Научные консультанты
член-корреспондент НАН РК,
доктор физико-математических
наук, профессор Рамазанов Т.С.
PhD, профессор Буфенди Лаифа

Республика Казахстан
Алматы, 2013

Kazakh National University after al-Farabi

JUMAGULOV MURAT

Diagnostic, structural and dynamic properties of dusty plasma in RF discharge

6D060400-Physics

Abstracts of each chapter of dissertation

Scientific supervisors
Doctor of Physics & Mathematics,
Professor Ramazanov T.S.
PhD, Professor Laifa Boufendi

Republic of Kazakhstan
Almaty, 2013

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ.....	7
2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ ПО ИЗУЧЕНИЮ СВОЙСТВ ПЫЛЕВОЙ ПЛАЗМЫ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО РАЗРЯДА.....	24
2.1 Экспериментальная установка по изучению структурных, динамических, оптических свойств пылевой плазмы высокочастотного разряда.....	24
2.1.1 Описание экспериментальной установки.....	24
2.1.2 Исследование структурных свойств плазменно–пылевых образований в емкостном высокочастотном разряде.....	27
2.1.3 Осуществление оптической диагностики.....	30
2.2 Экспериментальная установка по изучению свойств пылевой плазмы высокочастотного разряда с помощью много углового рассеяния.....	31
3 ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНЫХ, ДИНАМИЧЕСКИХ И ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПЫЛЕВОЙ ПЛАЗМЫ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО РАЗРЯДА.....	35
3.1 Радиальные функции распределения пылевых частиц в высокочастотном разряде.....	35
3.2 Коэффициент диффузии пылевой плазмы высокочастотного разряда.....	42
3.3 Оптические свойства пылевой плазмы высокочастотного разряда.....	51
3.3.1 Методика определения параметров буферной плазмы по спектрам излучения.....	51
3.3.2 Влияние присутствия пыли на излучение буферной плазмы.....	61
4 ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ПЫЛЕВОЙ ПЛАЗМЫ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО РАЗРЯДА С ПОМОЩЬЮ МНОГОУГЛОВОГО РАССЕЯНИЯ.....	69
4.1 Теоретические основы метода много углового рассеяния.....	69
4.2 Эксперимент, обработка данных и результаты.....	75
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	95
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	96

ВВЕДЕНИЕ

Общая характеристика работы. Диссертационная работа посвящена экспериментальному исследованию структурных, динамических и оптических свойств пылевой плазмы высокочастотного разряда. В работе применены передовые экспериментальные методы исследования, теоретические методы анализа результатов экспериментов, а также авторские компьютерные программы для обработки данных.

Актуальность темы. Исследование пылевой плазмы в настоящее время является бурно развивающимся научным направлением, привлекающим внимание ученых. Напомним, что пылевая плазма представляет собой обычную плазму с внедренными или образованными в ней частицами конденсированного вещества микронных размеров, благодаря этим размерам макрочастицы (пылинки) могут приобретать очень большие заряды, до $10^3 \div 10^5$ элементарных зарядов. В литературе она так же встречалась под другими названиями, например, плазма с конденсированной дисперсной фазой, аэрозольная плазма.

Пылевая плазма представляет интерес как при решении прикладных задач, так и для расширения наших знаний о фундаментальных явлениях природы, свойствах и строении вещества. Так дисперсная плазма в силу того, что макроскопические пылинки визуальны различимы, представляет уникальный в своем удобстве объект для изучения некоторых физических свойств конденсированного вещества, например, фазовых переходов, процессов переноса и др.

Установлено, что во многих современных плазменных технологиях, из-за взаимодействия плазмы с поверхностью материалов в плазму из обрабатываемого материала попадают макроскопические частицы (размерами от доли до нескольких сотен микронов). В результате образуется плазма сложного состава. Наиболее общеупотребительное название такой плазмы – пылевая (dusty plasma). Интересным фактом является то, что пылевая плазма образует при определенных условиях упорядоченные структуры («плазменный кристалл», облака, капли). Все эти плазменно-пылевые структуры представляют собой естественно возникающее нежелательное загрязнение и отрицательным образом влияют на физико-механические свойства (микротвердость, коррозионная стойкость и т.п.) конструкционных материалов.

Одной из важных научных и технологических проблем является осуществление управляемого термоядерного синтеза. Образующаяся в Токамаке пристеночная пылевая плазма может сыграть большую роль: последние экспериментальные данные показывают, что наличие пыли в плазме может повлиять на глобальное время удержание энергии.

Новым является применение плазмы в производстве высокотехнологичных композитных материалов, например, небольших сферических частиц с нанопокрывами, нанесенными в плазме. Для изучения образования однородного порошка из пылевых частиц с заданными свойствами и стабильного его производства, необходимо найти оптимальные условия и время выработки.

Таким образом, исследование свойств пылевой плазмы, ее диагностика является очень актуальной задачей, как с научной, так и с прикладной стороны.

Диссертационная работа выполнена в соответствии с планами фундаментальных научно-исследовательских работ (НИР) : грант МОН РК «Оптимизация режимов работы термоядерных энергетических реакторов на основе комплексного изучения свойств пылевой пристеночной плазмы» Шифр 1115/ГФ.

Цель работы – Экспериментальное исследование свойств пылевой плазмы ВЧ разряда с помощью оптико-спектроскопических методов анализа, выявление эффектов взаимного влияния плазмы и пылинок, изучение процессов образования и роста пылевых частиц с помощью метода многоуглового рассеяния.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

- получить экспериментальные данные по структурным, динамическим и оптическим свойствам плазмы ВЧ разряда, не содержащей и содержащей пылевую компоненту, сравнить и сделать выводы;

- с целью определения параметров плазмы обработать данные по спектрам излучения плазмы ВЧ разряда, не содержащей и содержащей пылевую компоненту, сравнить и сделать выводы;

- создать экспериментальную установку по изучению свойств пылевой плазмы высокочастотного разряда с помощью много углового рассеяния

- получить и проанализировать экспериментальные данные по излучению пылевой плазмы высокочастотного разряда на установке с много угловым рассеянием. С помощью математической обработки экспериментальных данных определить характеристики пылевых структур (размеры, концентрацию). Сравнить с результатами теории Ми.

Объектом исследования является неидеальная пылевая плазма высокочастотного разряда.

Предмет исследования – структурные характеристики (корреляционные функции, концентрация, размеры и формы пылевых частиц), динамические характеристики (распределение пылинок по скоростям, коэффициент диффузии), оптические свойства (спектры и интенсивности излучения, индикатрисы рассеяния) пылевой плазмы.

Методы исследования. При решении задач, необходимых для достижения поставленной цели, использовались следующие методы: бесконтактные экспериментальные методы исследования структурных и динамических свойств пылевых структур с помощью видеозаписи, оптические методы диагностики буферной плазмы без пыли и с пылью, метод многоуглового рассеяния света на пылевых образованиях.

Новизна работы. Новизна и оригинальность диссертационной работы заключаются в том, что в ней впервые:

1. Замечено, что при увеличении температуры пылевой плазмы величина коэффициента диффузии пылевой компоненты может уменьшаться по

сравнению с величиной коэффициента диффузии невзаимодействующих пылинок,

2. Обнаружено, что уменьшение или увеличение интенсивности излучения буферной плазмы зависит от диапазона размеров пылевых частиц, помещенных или образованных в буферной плазме.

3. Впервые выполнены эксперименты на новой установке по многоугловому рассеянию света. Полученные экспериментальные данные, свидетельствуют о высокой эффективности данной установки.

4. Полученные на установке по много угловому рассеянию света новые результаты дают диапазоны параметров высокочастотного разряда в смеси аргона и ацетилена, оптимальные для образования частиц размером в сотни нанометров.

Научно-практическая значимость работы. Полученные в диссертационной работе результаты представляют ценность для развития как физики пылевой плазмы, так и методики экспериментов по изучению плазменно-пылевых образований. Исследование свойств пылевой плазмы представляет на данный момент большую фундаментальную значимость, поскольку пылевая плазма ввиду больших размеров пылинок, доступных визуальному наблюдению, представляет собой хорошую модель для исследования свойств систем, причем как газов, жидкостей, так и веществ в конденсированном состоянии. Кроме того, полученные результаты по свойствам пылевой плазмы можно использовать при проектировании и осуществлении различных практических приложений, связанных с наличием пылевой плазмы, таких, например, как микро и наноэлектроника.

Положения, выносимые на защиту

1. Вследствие роста заряда пылинок (связи в системе) при увеличении приложенной мощности разряда отношение коэффициента диффузии пылевой компоненты к значению коэффициента диффузии идеального газа уменьшается.

2. Поглощение электронов пылевыми частицами микронных размеров приводит к уменьшению интенсивностей излучения спектральных линий буферного газа.

3. Новая экспериментальная установка по много угловому рассеянию света в плазме высокочастотного разряда позволяет эффективно изучать формирование пылевых образований.

4. В химически активной плазме высокочастотного разряда в смеси аргона с ацетиленом пылевые частицы образуются быстрее при увеличении давления.

Апробация работы и публикации. Результаты, полученные в диссертационной работе, докладывались и обсуждались:

–на Международной конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых (2011 КазНУ им. аль-Фараби, Алматы);

–на Международных конференциях «Физика плазмы и плазменные технологии» (2009, Минск, Беларусь);

–на Международных научных конференциях «Современные достижения физики и фундаментальное физическое образование» (2011, 2013, Алматы);

–на Международной конференции по физике пылевой плазмы (2010, Гармишпартенкирхен, Германия);

–на Международном семинаре по физике неидеальной плазмы (сентябрь 2012, Росток, Германия);

–на научных семинарах кафедры физики плазмы и компьютерной физики КазНУ им. аль-Фараби;

а также обсуждались с профессорами: Майоровым С.А. (Россия), Дьячковым Л.Г.(Россия) в рамках международного сотрудничества.

По материалам диссертационной работы опубликовано 12 печатных работ: 5 статей в рецензируемых научных журналах, из них 3 в журналах из Перечня Комитета для опубликования основных результатов диссертаций на соискание ученой степени доктора PhD и 2 статьи в журналах дальнего зарубежья с высоким импакт-фактором; 7 работ в материалах Международных конференций.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, 4 разделов, заключения и списка использованных источников из 83 наименований, содержит 101 страниц основного компьютерного текста, включая 62 рисунка и 3 таблицы.

INTRODUCTION

The general characteristics of work. The thesis is devoted to the experimental study of the structural, dynamic and optical properties of the rf discharge dusty plasma.

Relevance of the theme. The study of the dusty plasma is now a developing scientific field, attracting the attention of scientists. Recall that the dusty plasma is conventional plasma with inserted or formed therein particles of condensed matter of microns sizes, the size of these particulates (dusts) can acquire very large charges up to $10^3 \div 10^5$ of the elementary charges. In the literature, it is also named as plasma with a condensed dispersed phase, aerosol plasma.

Dusty plasma is of interest both for the solution of the applied problems, and to expand our knowledge of the fundamental phenomena in nature, properties and structure of matter. Due to the fact that the macroscopic dust are visually distinguishable the dispersed plasma is unique comfort object for the study of some physical properties of condensed matter, such as phase transitions, transport processes, etc.

It was found that in many modern plasma technologies, due to the interaction of the plasma with the material surfaces macroscopic particles from the material fall into the plasma (sizes are from micron fractions up to a few hundred microns). As result complex plasma is formed. The most common name of this plasma is dusty plasma. An interesting fact is that the dusty plasma forms under certain conditions the ordered structures ("plasma crystal", clouds, droplets). All of these plasma- dust structures are naturally occurring undesirable contamination and negatively affect on the physical and mechanical properties (microhardness, corrosion resistance, etc.) of the constructional materials.

One of the most important scientific and technological problems is the realization of the controlled thermonuclear fusion. Formed in the wall region of the Tokamak dusty plasma can play a big role: recent experimental data show that the presence of dust in the plasma can affect the global energy confinement time.

The use of the dusty plasma in the production of high composite materials is new field of application, for example, small spherical particles with nanocoating deposited in the plasma. In order to study formation of a homogeneous powder of the dust particles with desired properties and stability of its production, it is necessary to find the optimal conditions and time of production.

Thus, the study of dusty plasma properties, their diagnostics are very important tasks, both from the scientific and applied aspects.

The aim of the work is experimental study of dusty plasma of RF discharge by optical spectroscopic methods of analysis, identification of the effects of the mutual influence of plasma and dust particles, the study of the formation and growth of dust particles by the method of multi-angle light scattering.

The object of the study is the non-ideal dusty plasma of RF discharge.

Scientific novelty includes:

1. At the first time it has been noted that at increase in plasmas temperature the diffusion coefficient of the dust component can decrease in comparison with the value of the diffusion coefficient of non-interacting dust particles.

2. It was found that the reduction or increase in the buffer plasma emission intensity depends on the range of the size of the dust particles, placed or formed in the buffer plasma.

3. Experiments on the new installation of the multi-angle light scattering were performed for the first time. The experimental data indicate a high efficiency of the installation.

4. Resulting in a plant for a lot of angular light scattering results provide new ranges for the parameters of high-frequency discharge in a mixture of argon and acetylene optimal for the formation of particles up to hundreds of nanometers.

Structure and volume of the thesis. The thesis consists of an introduction , four chapters , conclusions and a list of sources used in 83 titles, contains 101 pages of basic computer text , including 62 figures and 3 tables.

The main results are including:

1. Due to the increase in charge of particles (coupling between particles) with rise in dust plasma temperature the ratio of the diffusion coefficient of dust components to the diffusion coefficient of the ideal gas decreases.

2. The absorption of electrons by the dust particles of micron size leads to a decrease in emission intensities of the spectral lines of the buffer gas.

3. Testing of the new experimental setup for multi- angular light scattering on the dust formations developed in the plasma of the radio frequency discharge in reactive gas showed great promise of this installation in the diagnosis and getting dust particles with the desired properties.

4. In the reactive plasma of radio frequency discharge of the mixture of argon and acetylene the dusty particles are formed more rapid when pressure increases.

Scientific and practical significance of the work. The results obtained in the thesis are valuable for the development of the dusty plasma physics, and experimental techniques for the study of plasma-dust structures. The study of the dusty plasma is currently most fundamental importance as a dusty plasma due to large dust grains, that are available to visual observation, provides a good model for studying of the properties of systems as gases, liquids and substances in the condensed state. In addition, the results on the plasmas properties can be used in the design and implementation of a variety of practical applications associated with the presence of a dusty plasma, for example, micro-and nanoelectronics.

Approbation of the work and publications. The results obtained in the thesis were presented and discussed:

- at the International conference of students , undergraduates, graduate students and young scientists (2011, Al- Farabi Kazakh National University, Almaty);
- International Conferences on " Plasma Physics and Plasma Technology " (2009, Minsk , Belarus);
- the International Conference "Recent Advances in Fundamental Physics and Physical Education " (2011, 2013, Almaty);

- the International Conference on the Physics of Dusty Plasmas (2010 , Garmishpartenkirhen , Germany);
- International Seminar on Physics of Nonideal Plasma (September 2012 , Rostock, Germany);
- scientific seminars of the Department of the Plasma Physics and Computer Physics of Al- Farabi Kazakh National University; and discussed with professors : S.A. Mayorov (Russia) , L.G. Dyachkov (Russia) in the framework of international cooperation.

According to the materials of the thesis were published in 12 publications: there are 5 articles in peer-reviewed journals, 3 of them in the journals, recommended by Committee of control of education of MES RK, 2 articles in the foreign journals with high impact factor ; 7 works in Proceedings of International Conference.

Structure and the volume of thesis. Thesis consist from introduction, four chapters, conclusion and the list of used sources of 83 titles, consist 101 pages including 62 pictures and 3 tables.

INTRODUCTION

Caractéristiques générales du travail : La thèse est dédiée à l'étude expérimentale des propriétés structurales, dynamiques et optiques d'un plasma poussiéreux produit par décharge électrique radiofréquence.

Pertinence du thème : L'étude des plasmas poussiéreux est maintenant un domaine scientifique en plein développement qui attire l'attention d'une large communauté de scientifiques. Rappelons que le plasma poussiéreux est un plasma classique avec des particules injectées ou qui s'y sont formées dont les tailles peuvent atteindre quelques micromètres. Ces particules (poussières) peuvent acquérir de très grandes charges jusqu'à 10^3 à 10^5 charges élémentaires. Dans la littérature, il est également appelé plasma à phase condensée dispersée, plasma aérosol et aussi plasma complexe.

Les plasmas poussiéreux sont d'un grand intérêt à la fois sur le plan pratique afin de trouver des solutions à des problèmes industriels et sur le plan scientifique fondamental afin d'élargir nos connaissances sur les phénomènes fondamentaux de la nature ainsi que les propriétés et la structure de la matière. En raison du fait que les particules de poussière macroscopique sont visuellement distinguables, le plasma poussiéreux est un objet d'étude unique pour l'étude de certaines propriétés physiques de la matière condensée, telles que les transitions de phase, la propagation d'ondes, les phénomènes de dislocation, les processus de transport, etc...

On a constaté que dans de nombreuses technologies modernes mettant en œuvre un plasma, en raison de l'interaction du plasma avec la surface des matériaux, des particules macroscopiques sont éjectées de celles-ci dans le plasma (dont les taille peuvent être de quelques nanomètres jusqu'à quelques dizaines de micromètres). Il en résulte ainsi la formation d'un plasma complexe. Le nom le plus commun de ce plasma est un plasma poussiéreux. Un des aspects les plus intéressants est la formation dans certaines conditions de structures ordonnées (« cristaux ou liquide coulombiens »). Toutes ces structures plasma-poussière, se formant de façon naturelle, sont une contamination indésirable qui affecte négativement les propriétés physiques et mécaniques (micro dureté, résistance à la corrosion, etc.) des matériaux et dispositifs manufacturés.

L'un des problèmes scientifiques et technologiques les plus importants, à l'heure actuelle, est la réalisation de la fusion thermonucléaire contrôlée. Dans ces conditions extrêmes se forment aussi au voisinage des parois des Tokamaks des poussières qui jouent un rôle fondamental : les données expérimentales récentes montrent que la présence de poussières dans le plasma peut affecter le temps global de confinement du plasma.

L'utilisation du plasma poussiéreux dans la production de matériaux composites, à haute valeur ajoutée, est un nouveau champ d'applications. On peut citer à titre d'exemples, le traitement de surface de petites particules sphériques avec des revêtements, d'épaisseur nanométrique, déposés par plasma. Afin d'étudier les mécanismes de formation de particules homogènes ayant des propriétés désirées et une production stable, il est nécessaire de trouver les conditions optimales de production.

Ainsi, l'étude des propriétés des plasmas poussiéreux et leurs diagnostics sont des tâches très importantes, à la fois pour les connaissances scientifiques fondamentales et que pour les aspects appliqués.

Le but de ce travail est l'étude expérimentale de plasmas poussiéreux générés par une décharge électrique RF par des méthodes de spectroscopie d'émission optique, l'étude de l'influence des interactions mutuelles des particules piégées dans le plasma, l'étude de la formation et la croissance des particules de poussière par diffusion multi-angles de la lumière laser.

L'objet de l'étude est un plasma poussiéreux non-idéal généré par décharge électrique haute fréquence.

Les nouveautés scientifiques comprennent :

1. Dans un premier temps, il a été constaté que lors de l'augmentation de la température électronique du plasma, le coefficient de diffusion de la composante poussière peut diminuer par rapport à la valeur du coefficient de diffusion des particules de poussière en l'absence d'interactions mutuelles.
2. Nous avons mis en évidence que la réduction ou l'augmentation de l'intensité d'émission du plasma dépend de la gamme de la taille des particules de poussière qui y sont injectées ou formées.
3. Des expériences sur la nouvelle installation de la diffusion multi-angle de la lumière laser ont été réalisées pour la première fois. Les données expérimentales montrent une efficacité élevée de l'installation pour la caractérisation in-situ des nanoparticules.
4. Résultant dans une installation pour un grand nombre de résultats angulaires de diffusion de lumière fournit de nouvelles plages pour les paramètres de la décharge à haute fréquence dans un mélange d'argon et d'acétylène optimal pour la formation de particules jusqu'à des centaines de nanomètres.

Structure et le volume de la thèse. La thèse se compose d'une introduction, de quatre chapitres, les conclusions et une liste des sources utilisées dans 83 titres, contient 101 pages de texte de base de l'ordinateur, y compris les 62 chiffres et 3 tables.

Les principaux résultats sont notamment:

1. En raison de l'augmentation de la charge de grains (couplage entre les particules) avec augmentation de la température du plasma de poussière le rapport entre le coefficient de diffusion des composants de la poussière pour le coefficient de diffusion du gaz parfait diminue.
2. L'absorption des électrons par les particules de poussière de la taille du micron conduit à une diminution de l'intensité d'émission des raies spectrales du gaz tampon.
3. L'essai du nouveau dispositif expérimental pour multi- angulaire diffusion de la lumière sur les formations de poussières développées dans le plasma de la décharge de fréquence radio en gaz réactif a montré une grande promesse de cette installation dans le diagnostic et l'obtention des particules de poussière avec les propriétés désirées.
4. Mise en œuvre d'une nouveau réacteur permettant l'observation à différents angle de la lumière laser diffusée par les particules durant leur formation dans un plasma dans un mélange gazeux argon-acétylène. Ceci nous donnera accès à une multitude de caractéristiques des nanoparticules.

Importance scientifique et pratique du travail. Les résultats obtenus dans la thèse sont précieux pour le développement de la physique des plasmas poussiéreux, et des techniques expérimentales pour l'étude des structures des poussières piégées dans le plasma. Cette étude trouve son importance dans le fait que ces particules sont aisément observables ce qui fournit un bon modèle pour l'étude des propriétés des systèmes comme les gaz, les liquides et la matière à l'état condensé. En outre, les résultats sur les propriétés de plasmas peuvent être utilisés dans la conception et la mise en œuvre d'un grand nombre d'applications pratiques comme par exemple dans le domaine de la micro- et nano-électronique.

Approbation des travaux et publications. Les résultats obtenus dans le cadre du travail de recherche lié à cette thèse ont été présentés et discutés :

- Lors de la conférence internationale des étudiants, étudiants de premier cycle , des étudiants diplômés et des jeunes scientifiques (2011 , Al -Farabi Kazakh National University, Almaty);
- Conférences internationales sur " la physique des plasmas et de la technologie Plasma» (2009, Minsk, Biélorussie);
- La Conférence internationale " Les progrès récents de la physique fondamentale et de l'éducation physique » (2011 , 2013 , Almaty);

- La Conférence internationale sur la physique des plasmas poussiéreux (2011, Garmisch-Partenkirchen , Allemagne);
- Séminaire international sur la physique des plasmas non idéaux (Septembre 2012, Rostock, Allemagne);

• Séminaires scientifiques du département de la physique des plasmas et informatique Physique de l'Université Al -Farabi nationale kazakhe ; et discuté avec des professeurs : SA Mayoroff (Russie) et LG Dyachkov (Russie) dans le cadre de la coopération internationale.

Les résultats les plus marquants de cette thèse ont fait l'objet de 12 publications : 5 articles dans des revues à comité de lecture, 3 d'entre eux dans les journaux recommandés par le Comité de contrôle de l'éducation de MES RK, 2 articles dans des revues internationales avec facteur d'impact élevé et 7 dans les Actes de Conférences internationale.

Structure et volume du mémoire. Le manuscrit de thèse, de 101 pages, 62 photos et 3 tableaux, se compose d'une introduction, de quatre chapitres, de la conclusion et d'une liste des références bibliographiques.

1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ

Интерес к пылевой плазме значительно вырос за последние два десятилетия, прошедших с момента, когда пылевые кристаллы в плазме впервые наблюдали независимо Г.Морфилл с коллегами в Германии [1] и J. Chu с Lin I в Тайване [2]. В отличие от экспериментов группы Г. Морфилла, здесь инжектировались частицы переменного размера, которые генерировались в результате химических реакций путем образования частицы SiO_2 . Хотя частицы сильно отличались по размерам, тем не менее, наблюдалась четкая кристаллическая структура, сформированная частицами с линейными размерами ~ 10 мкм. Постоянные решетки, которые соответствовали центрированному кубу, соответственно равны 180 и 130 мкм.

Сегодня пылевая плазма является одной из наиболее активно изучаемых областей исследования в современной физике плазмы. Ее уникальный и сложный характер определяется рядом физических процессов, которые могут происходить в пылевой плазме и, следовательно, делает ее очень интересным объектом для широкого круга исследователей из самых разных областей, что описано, например, в работе [3].

Пылевая плазма по своему определению является системой, в которой присутствуют микронных размеров частицы твердых веществ, взвешенных в плазменной среде. Значительный заряд (порядка $10^3 - 10^5$ заряда электрона) пылинки приобретают в результате поглощения потоков электронов и ионов окружающей плазмы. Вследствие высокой подвижности электронов заряд, приобретаемый макрочастицами, в большинстве случаев отрицательный. В тех случаях, когда интенсивны процессы термоэмиссии или фотоэмиссии электронов с поверхности пылинок, заряд может быть и положительным. Диссипация кинетической энергии макрочастиц происходит большей частью из-за столкновений с нейтралами фоновой (буферной) плазмы. Совместное действие сил межчастичного взаимодействия с процессами диссипации может приводить к формированию упорядоченных плазменно-пылевых структур, подобных жидкости или твердому телу. Левитация пылевых частиц в плазме происходит, когда заряженные частицы пыли попадают в ловушку в потенциальных ямах, созданных конкретными распределениями электрического поля в плазме [4-6]. В зависимости от температуры и давления буферной плазмы пылевые частицы могут образовывать структуры различной степени сложности.

Нужно отметить, что частицы не только инжектируются в плазменную среду, но так же могут самостоятельно образоваться в ней из-за скопления нанокластеров и продуктов распыления на поверхности электродов или камеры, а так же после плазмохимических реакций в плазмообразующем газе. Пылевая плазма так же встречается в высокоэнергетических установках синтеза в пристеночной области, в промышленных реакторах микро и наноэлектроники, в установках для получения интегрированных микросхем и их компонентов, в исследовательских стендах, в космосе и т.д.

Экспериментальное исследование пылевой плазмы в основном проводится в газовых разрядах постоянного тока и высокочастотных (ВЧ) разрядах. Синусоидальное распределение электрического поля по всему положительному столбу разряда постоянного тока при определенных параметрах плазмы позволяет создавать потенциальные ловушки для пылевых частиц. В случае ВЧ-разряда пылевые структуры образуются в плазме, образованной между двумя горизонтально расположенными параллельно электродами и облако пыли парит между этими электродами, но ближе к нижнему. В обоих случаях механизмы зарядки пыли, левитации и расположения облака пыли одни и те же [7].

Эксперименты с пылевой плазмой в разряде постоянного тока привлекательны своей простотой как для экспериментальных, так и теоретических исследований, а также возможностью влиять на пылевые образования внешним воздействием, таким как магнитное поле, нагрев или введение электрически заряженного зонда [8-10]. Однако, с практической точки зрения, наиболее важные исследования являются те, которые связаны с разрядами ВЧ. Это связано с широким использованием ВЧ разряда во многих технологических приложениях, таких как обработка материалов, микроэлектроника и плазменные промышленные установки [3,11,12]. Таким образом, очень важно понимание поведения пылевых частиц в ВЧ разряде и влияния пылевых частиц на плазменные параметры и наоборот.

В последнее время получает развитие более позитивный подход к наличию пыли в объеме плазмы. Новые научные направления сосредоточены на применениях частиц пыли, созданных в плазме. Эти частицы могут иметь разнообразные ценные свойства, которые делают их пригодными в технологиях нанесения тонких пленок, производстве технологических керамик и катализа. Новым является применение плазмы в производстве высокотехнологичных композитных материалов, например, небольших сферических частиц с нанопокровностями, нанесенными в плазме. Совместное осаждение частиц кремния нанометрового масштаба может привести к значительному улучшению в стабильности солнечных элементов [13,14]. Новые технологии плазменного производства частиц определяют высокие требования к качеству получаемых частиц. Для изучения образования однородного порошка из пылевых частиц с заданными свойствами и стабильного его производства, необходимо найти оптимальные условия и время выработки. Таким образом, необходима разработка более совершенных методов диагностики свойств частиц.

В качестве основных методов диагностики пылевой плазмы можно выделить методы на основе рассеяния света, фотонно-индуцированные процессы и эмиссионную спектроскопию. Рассеяние света легко осуществить экспериментально, поэтому этот метод диагностики широко используется во время эксперимента, чтобы проверить наличие частиц пыли в объеме разряда. Однако, получение количественных данных из измерений по рассеянию света, достаточно трудно осуществить. В начале этого века, Рэлей и Ми разработали полную теорию рассеяния света объектами, намного меньшими, чем длина рассеиваемого света (рассеяние Рэрея), или сравнимыми с длиной волны

(рассеяние Ми). Полное описание разработанных теорий можно найти в монографиях ван дер Хулста [15] и Борена [16]. Наиболее важной точно решаемой задачей в теории рассеяния малыми частицами является задача о шаре. Формальное решение этой задачи было известно уже много лет, практически для расчетов оно стало использоваться с появлением ЭВМ. В 1908 г. Г. Ми разработал теорию, объясняющую окраску коллоидных растворов золота, обусловленную поглощением и рассеянием частицами золота. В настоящее время теория рассеяния и поглощения малыми частицами сферической формы получило общепринятое название «теории Ми». Подробное изложение истории задачи о шаре дано в работе [17].

Математика в теории Ми достаточно проста, однако, физическая интерпретация полученных результатов во многих случаях затруднительна. Очень сложно ясно представить структуру полей и на качественном уровне описать, как рассеивает и поглощает шар заданного радиуса с известными оптическими свойствами. Достоинством теории Ми является то, что она позволяет описать в первом порядке оптические эффекты в несферических частицах и правильно отражает эффекты. В рамках этой теории рассматривают интенсивность света, рассеянного на частице и связанного с ее размером, формой, (комплексным) показателем преломления, а также длиной волны и поляризацией света. Интенсивность рассеяния I_{SCA} пропорциональна концентрации частиц n_d в элементе объема ΔV и интенсивности падающего света I_0 :

$$I_{SCA} = n_d \Delta V Q_{SCA} I_0 \quad (1.1)$$

Интенсивность рассеяния имеет угловую зависимость. Другим параметром, который достаточно легко определить экспериментально, является затухание интенсивности падающего света $I(L)$ на длине L :

$$I(L) = I_0 \exp(-n_d \pi a_d^2 Q_{ext} L) \quad (1.2)$$

Затухание из-за поглощения и рассеяния на частицах с радиусом ad характеризуется эффективностью Q_{ext} (или сечением $\sigma_{ext} = \pi a_d^2 Q_{ext}$) экстинкции:

$$Q_{ext} = Q_{abs} + Q_{sca} \quad (1.3)$$

Аналитические выражения для эффективности рассеяния и поглощения, как правило, очень сложны, поэтому определение свойств частиц производится численно.

В работе [18] с помощью много углового рассеяния и обработки полученных сигналов с помощью теории Ми были изучены особенности формирования порошков в химически активной плазме и на основе этих

данных найдены оптимальные параметры плазмы и условия для стабильного роста производимого порошка. Чтобы избежать неправильной интерпретации измерений, обширное исследование было посвящено нахождению условий для обеспечения формирования однородного порошка в большей части разрядного объема. Опишем их установку. Схематический вид сверху экспериментальной установки по много угловому рассеянию приведен на рисунке 1.1. Здесь показан плазменный реактор, все устройства для измерения интенсивности проходящего через плазму лазерного луча и обнаружения рассеяния лазерного луча на трех углах. Путь измеряется с помощью ПЗС-камеры (CCD), также показаны P- поляризатор, L-линзы, D - диафрагма, BP - 488 нм полосовой фильтр, ND - фильтр нейтральной плотности, PD - фотоприемник.

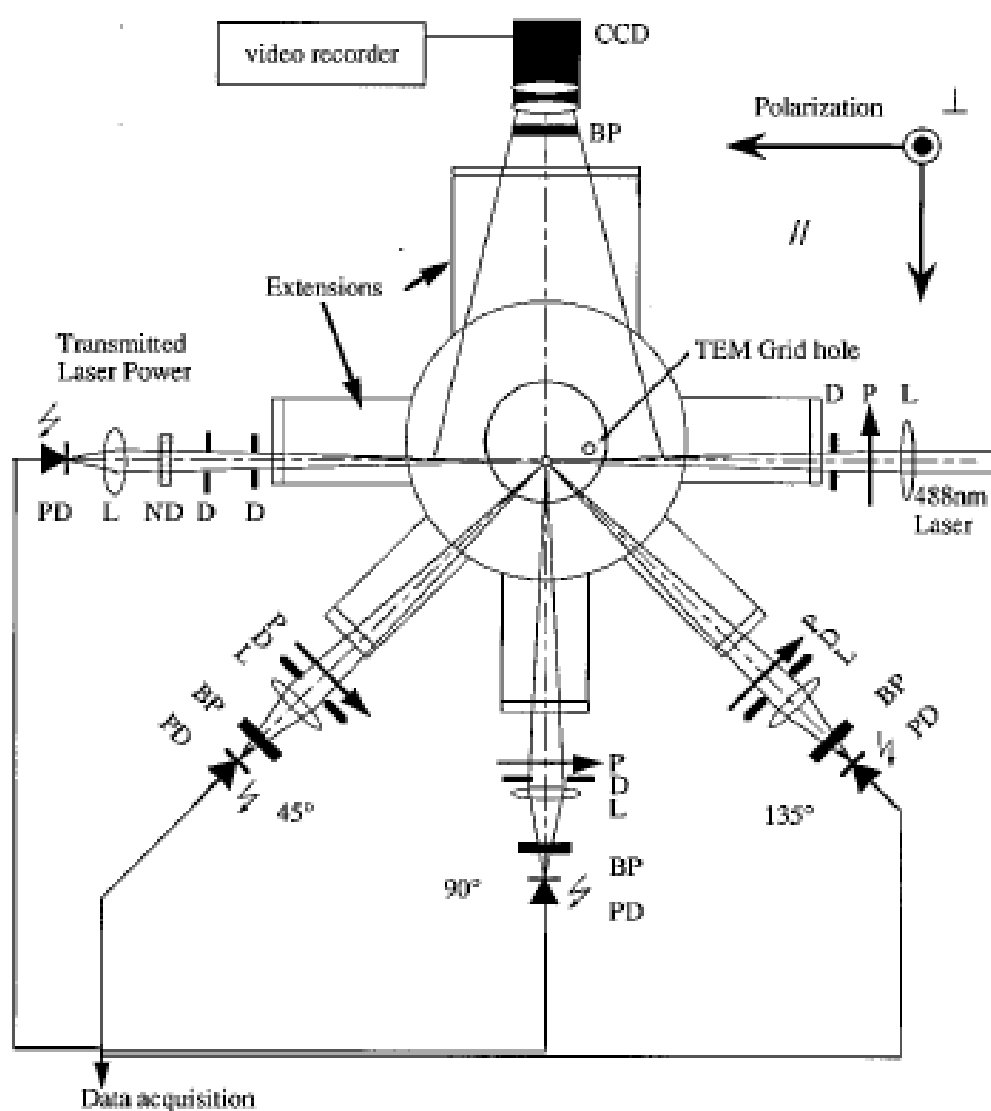


Рисунок 1.1 - Схематический вид сверху экспериментальной установки многоуглового рассеяния

Падающий пучок и детекторы могут быть перемещены в любую аксиальную точку внутри зазора между электродами и радиально на ± 40 мм,

из-за ограничений ширины окна под углом 45° и 135° . Были выбраны следующие экспериментальные параметры: частота 13,56 МГц при мощности 2.9 Вт/см². Лазер был расположен на 5 мм выше над заземленным электродом и на 29 мм от оси электрода в сторону к детекторам. Рисунок 1.2 представляет собой изменение интенсивностей (I/I_0) лазерных излучений с различными значениями плотности энергии. Как можно видеть, ниже 7.5 Вт/см² мощность лазера не влияет на переданную интенсивность. Выше этого значения лазерное излучение воздействует на формирование частиц в пределах лазерного луча. Причиной данного явления могут быть испарение частиц лазерным лучом и / или термофоретический эффект, вызванный температурным градиентом между областью прохождения лазера и остальной частью плазмы. Все последующие эксперименты были сделаны с мощностью лазера 5 Вт/см².

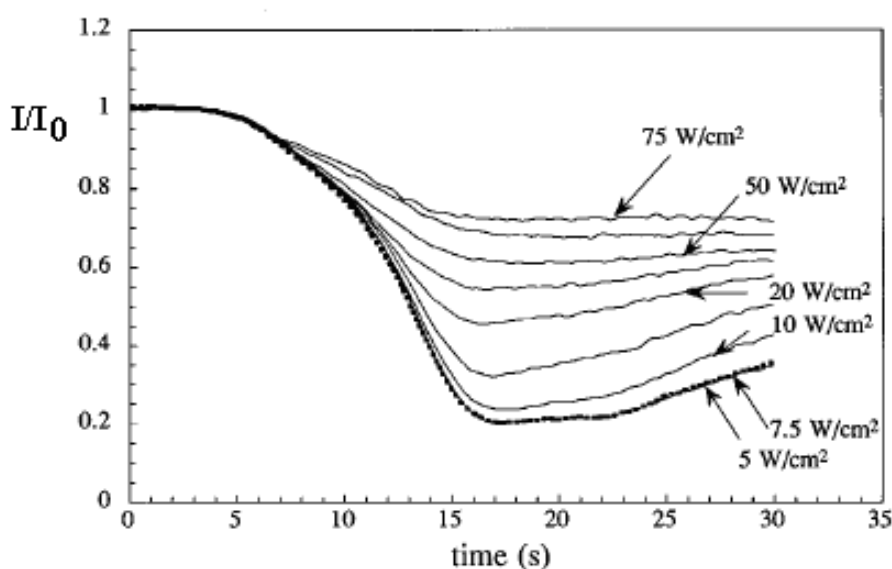


Рисунок 1.2 - Изменение интенсивностей лазерных излучений с различными значениями плотности энергии

Для частиц меньше, чем $a_d < 0.1\lambda$ рассеяние света на сферических однородных частицах описывается теорией Рэлея-Ганса, а также теорией Ми-Лоренца для более крупных частиц. Процедура для получения эволюции во времени радиуса и плотности частиц с использованием измерений на одном угле рассеяния света в 90° описана в работе [19]. Коэффициент линейной поляризации $P = (W_{\perp} - W_{\parallel}) / (W_{\perp} + W_{\parallel})$ зависит от коэффициента преломления $m = m' + im''$, от параметра размера $x = \frac{2\pi a_d}{\lambda}$ и не зависит от числовой плотности частиц. Для решения проблемы нахождения четырех неизвестных величин (a_d, n_d, m', m'') по трем независимым измерениям ($W_{\perp}, W_{\parallel}, I/I_0$) может быть использован метод углового рассеяния. Этот метод редко использовался для исследования

формирования порошка, за исключением работ [20-21], в которых рассеянный свет измерялся под углом 90° и 12° . Для измерений рассеянной интенсивности при трех углах $\sim 45^\circ$, 90° и 135° использовался тот же итерационный метод для одного угла, чтобы определить время развития радиуса и плотности числа частиц. Для каждого значения m' и m'' алгоритм ВНМІЕ [16] рассчитывает значения коэффициента поляризации и рассеянных интенсивностей, которые должны одновременно интерполировать соответствующие экспериментальные точки.

Для рассеяния света на очень маленьких частицах (рассеяние Рэлея) выражение для интенсивности рассеянного света с перпендикулярной поляризацией и для плотности числа частиц n_d в объеме ΔV с телесным углом $\Delta\Omega$ изотропно и дается выражением [16]:

$$W_{\perp} = \sigma_{scatt} I_0 \frac{\Delta\Omega}{4\pi} n_d \Delta V \quad (1.4)$$

где I_0 - мощность падающего лазерного излучения в Вт/м² и σ_{scatt} - сечение рассеяния, определяемое, для малых частиц, как

$$\sigma_{scatt} = \frac{128\pi^5 a_d^6}{3\lambda^4} \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^2 \quad (1.5)$$

Для параллельной поляризации интенсивность рассеяния всегда равна нулю при угле 90° , что дает простой экспериментальный критерий для справедливости приближения Рэлея. Предполагая, что частицы монодисперсны по всей длине лазерного луча, передаваемая доля мощности I/I_0 не зависит от поляризации

$$I / I_0 = \exp[-\sigma_{ext} n_d d] \quad (1.6)$$

где d является длиной пути лазерного луча. σ_{ext} является линейно усредненным сечением экстинкции (суммы сечений рассеяния и поглощения), где первый пренебрежимо мал для коэффициента преломления, характерного для аморфного кремния.

$$\sigma_{ext} = \sigma_{scatt} + \sigma_{abs} \approx \sigma_{abs} = \frac{8\pi^2 a_d^3}{\lambda} \text{Im} \left\{ \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right\} \quad (1.7)$$

Длина пути лазерного луча d оценивали по измерениям с видеозаписи камеры. Это измерение важно для точного определения плотности числа частиц.

Отношение (1.4) к логарифму от (1.6) приводит к определению относительного радиуса частицы. Необходимые калибровки для получения n_d и значения a_d были сделаны с помощью измерений просвечивающей электронной микроскопии (ТЕМ - transmission electron microscopy). Для этой цели частицы для ТЕМ измерений собирались за время перехода Рэлея-Ми, совпадающего с появлением интенсивности $W_{||}$, чтобы откалибровать интенсивности рассеянного света. Эта калибровка позволила определить абсолютный размер частиц и плотность частиц в виде функции от времени разряда.

Во время формирования порошка показания об интенсивности рассеянного света на трех углах снимали по 4 раза. Для каждого измерения передаваемый сигнал был использован для проверки условий разряда и производства порошка. С появлением интенсивности $W_{||}$ при 90° определялось время перехода Рэлея-Ми: $t_{R-M} = 6\text{ с}$. Для $t < t_{R-M}$ применима теория Рэлея, при $t > t_{R-M}$ использовалась теория Ми. В последнем режиме с помощью сигналов многоугольного рассеяния была определена степень поляризации P при 45° , 90° и 145° , из которых были оценены радиусы частиц [22].

Рисунок 1.3 (а) представляет собой эволюцию P для трех углов; сигналы воспроизведены вплоть до мельчайших деталей. На рисунке 1.3(б) показана интенсивность при поперечной поляризации на угле 135° , нормированная на соответствующую параллельную поляризацию $W_{\perp||}/W_{\perp\perp}$. Появление поперечной поляризации сигнала указывает на появление несферических частиц и / или многократного рассеяния. Размещение детекторов чуть выше лазерного луча позволило оценить вклад многократного рассеяния, который не превышал 5% -10% от интенсивности параллельной поляризации.

Поэтому можно заключить, что несферические частицы присутствуют в объеме рассеяния, если сигнал поперечной поляризации превышает этот предел. Следовательно, мы можем выделить два различных режима после этапа Рэлея: первый, примерно между 7 и 55 с, где $W_{\perp||}/W_{\perp\perp}$, значительно выше многократного рассеяния, что указывает на наличие не сферических агломератов, второй - для времен больше, чем примерно 55 с, когда были обнаружены лишь незначительные интенсивности поперечной поляризации, что указывает снова на преимущественное присутствие сферических частиц. Преимуществом поляризационного рассеяния лазерного света по отношению к методу круговой поляризации [23] является чувствительность к интенсивности поперечной поляризации.

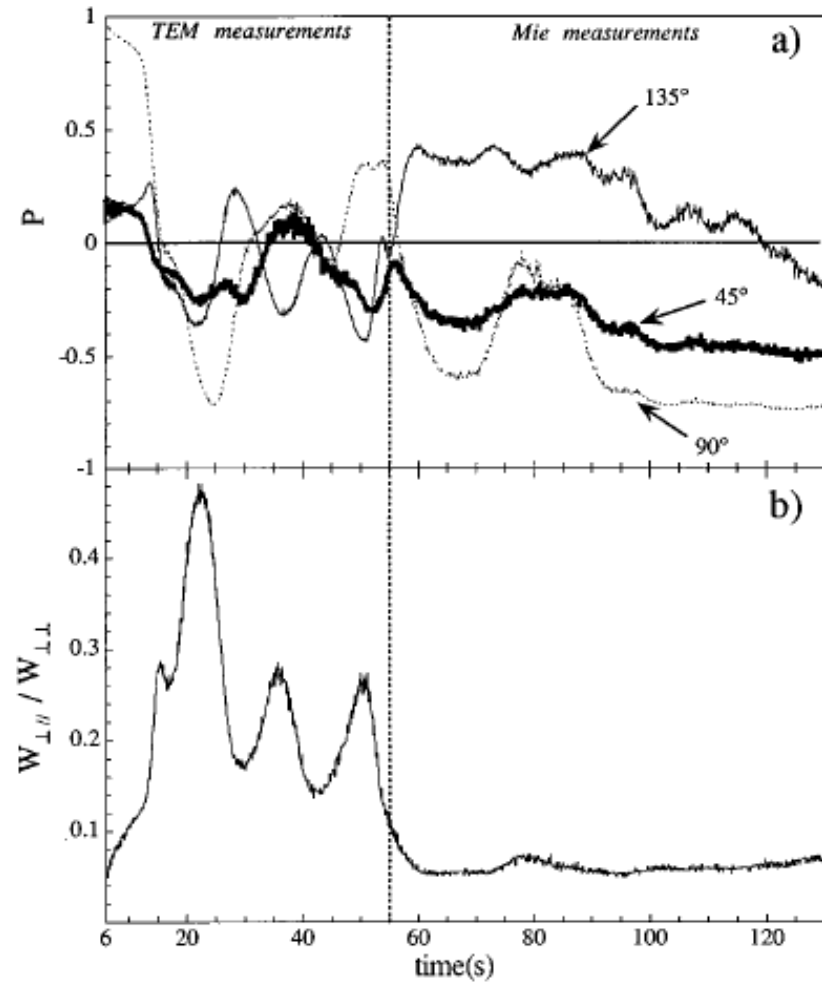


Рисунок 1.3 – Эволюции P для трех углов и $W_{\perp\parallel} / W_{\perp\perp}$

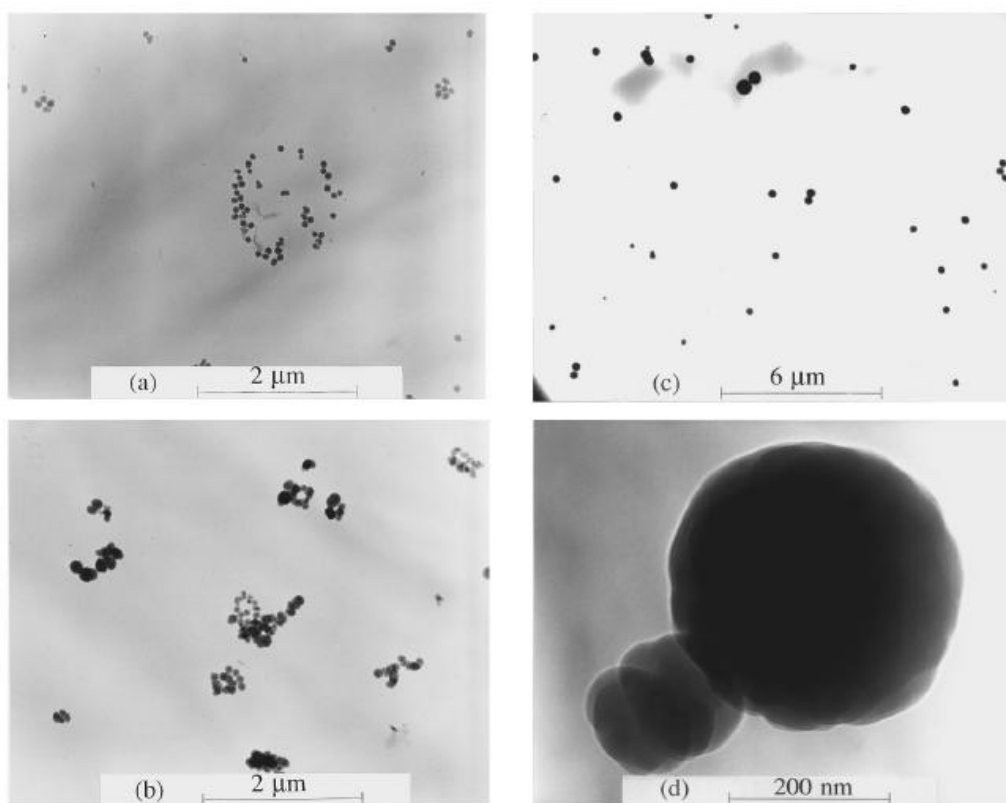


Рисунок 1.4 - Микрофотографии собранных частиц

Микрофотографии, представленные на рисунке 4, показывают собранные частицы или агломераты, которые образовались в плазме за различные времена разряда. На первом снимке (рисунок 1.4a) показаны небольшие сферические частицы размером около 40 нм в радиусе, собранные после 6 с. Этот результат используется для калибровки размеров и числовой плотности частиц в переходе Рэлея-Ми. Рисунок 1.4b показывает, что несферические агломераты были собраны через 15 секунд от начала разряда в плазме. За это время отношение $W_{\perp\parallel} / W_{\perp\perp}$ составляет около 30%. Данные 1.4c и 1.4d являются репрезентацией частиц, собранных после 77с плазменного воспламенения, рисунок 4 d является увеличенным фрагментом рисунка 4c. Кластеры после агломерации демонстрируют структуру земляники, снова близкой к сферической. Строго говоря, оригинальная Ми теория [24] не распространяется на несферические частицы и, следовательно, теория Ми в своем первоначальном виде не применяется в интервале времени между 7 и 55 с. Восстановление сферической геометрии частиц позже позволяет снова применить теорию Ми рассеяния и, следовательно, определить размеры и концентрации частиц. В интервале ~ 7 и 55 с нужно использовать другие методы для измерения размеров частиц. Теория Рэлея используется для получения данных вплоть до времени разряда, равного 6с. Отметим, что большая поперечная поляризация сигналов, как правило, сопровождается неустойчивостями с частотами в герцовом регионе, наблюдаемых как на рассеянных лучах света, так и на световом излучении

плазмы. Можно предположить, что эти неустойчивости возникают в результате уменьшения электронной плотности. Эти низкочастотные неустойчивости часто наблюдаются в пылевой плазме [25-28].

Так же в работе [18] установлено, что радиус частицы и плотность числа частиц в процессе агломерации могут быть хорошо описаны в рамках модели свободной броуновской коагуляции молекулы. В рамках этой модели был рассчитан заряд грейнов, который показал, что частицы в несколько десятков нанометров могут рассматриваться как нейтральные в условиях описанного эксперимента. Измеренные дисперсии частиц хорошо описываются моделью броуновской модели коагуляции молекулы, дающей нормальное распределение частиц по размерам.

Источники белого света создаваемые галогенными лампами тоже могут быть использованы при определении наличия пылевых частиц в плазме. Этот метод применялся для анализа характеристики пылевых частиц в силане [29]. Недостатком этого метода является то, что с его помощью можно получить только качественные данные. Диагностические методы на основе измерения поляризации также предлагают удобный способ определения размеров частиц. Данный способ основан на измерении отношения интенсивностей рассеяния при падении пучка света, поляризованного параллельно и перпендикулярно к плоскости рассеяния. Этот коэффициент является функцией размера частиц и был использован Ширатани и со-авторами [30] для измерения размера частиц и их распределения в объеме разряда.

В работе [21] подробно описаны методы определения размеров частиц с помощью измерений рассеяния на двух разных углах (угловая асимметрия), и в разных состояниях поляризации (поляризационная асимметрия). Кратко рассмотрим содержание этой работы. При условии однократного рассеяния, интенсивность света с волновым вектором k (интенсивность падающего излучения I_0 , p -поляризации), рассеянного от монодисперсных сферических частиц диаметром d и числовой плотности nd дается уравнением (1.4). В этом уравнении сечение рассеяния описывает взаимодействие падающего излучения с частицей, оно зависит от комплексного показателя преломления частиц m и от длины волны. При заданных m и длины волны сечение рассеяния может быть вычислено как функция от размера частиц для любой поляризации. Величина M_i функции рассеяния увеличивается на несколько порядков с увеличением диаметра частиц.

Уравнение (1.4) показывает, что интенсивность рассеянного света зависит как от диаметра, так и от плотности числа частиц. Поэтому необходимы два измерения для одновременного определения обеих величин. «Угловая асимметрия» основана на измерении интенсивности рассеянного света на двух различных углах, тогда как в экспериментах с «поляризационной асимметрией» интенсивности рассеянного света измеряются при фиксированном угле для двух различных ориентаций плоскости поляризации падающего света.

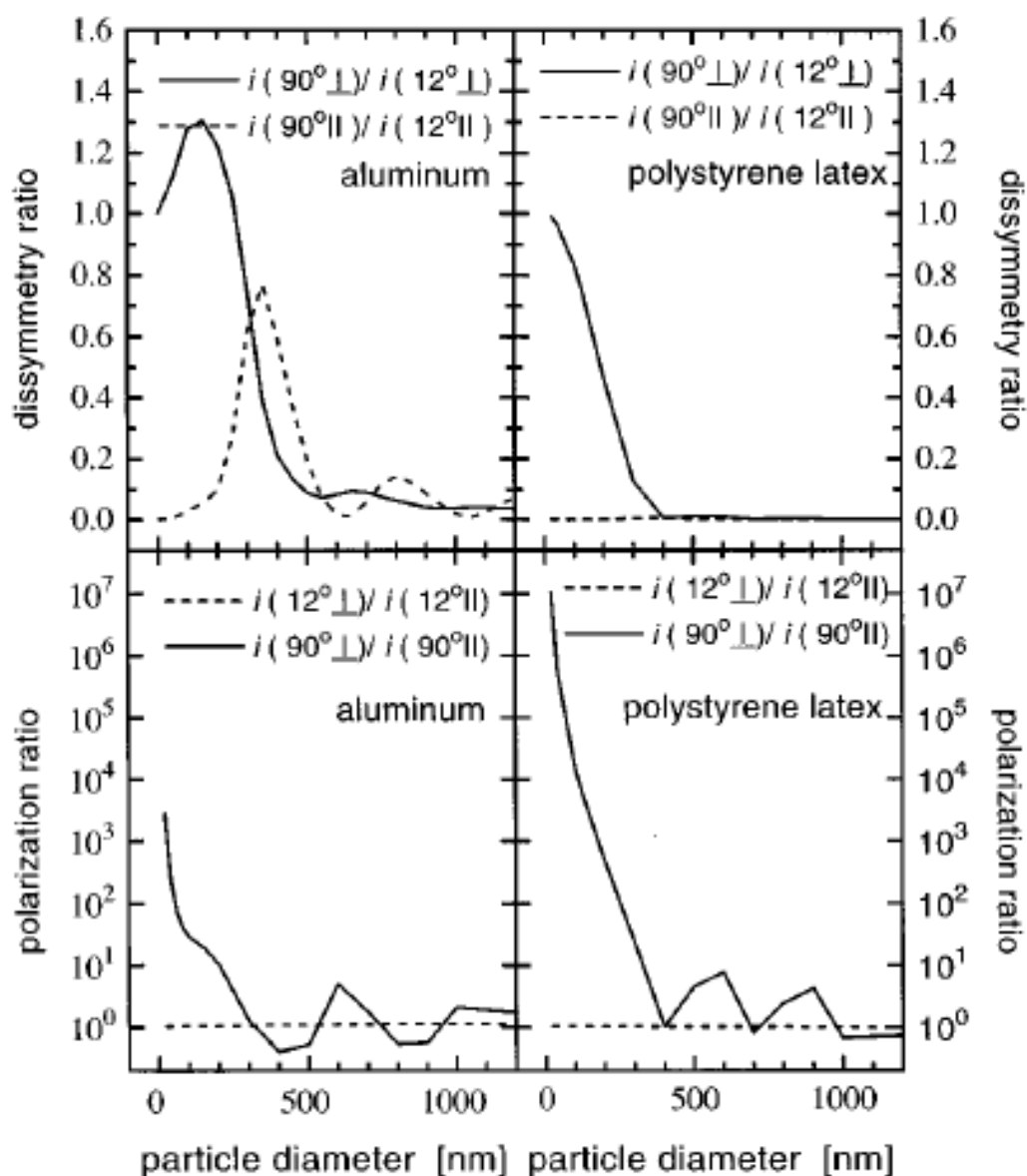


Рисунок 1.5 - Угловые и поляризационные отношения асимметрии для алюминиевых сфер в вакууме и для полистирольных латексных сфер в воде, соответственно, как функции от размера частиц

Другой метод диагностики с помощью рассеянного света основан на измерении интенсивностей рассеянных излучений с разными длинами волн. Эксперименты с несколькими длинами волн лазерного излучения требуют адекватной интенсивности падающего света, по меньшей мере на двух различных длинах волн, в связи с чем последний подход затруднен в реализации.

Поскольку плотность числа частиц одинакова для обоих углов измерений или ориентации поляризации, отношение двух измеренных интенсивностей зависит только от диаметра частиц. Это отношение называется отношением угловой или поляризационной асимметрии. На рисунке 1.5 показаны угловые

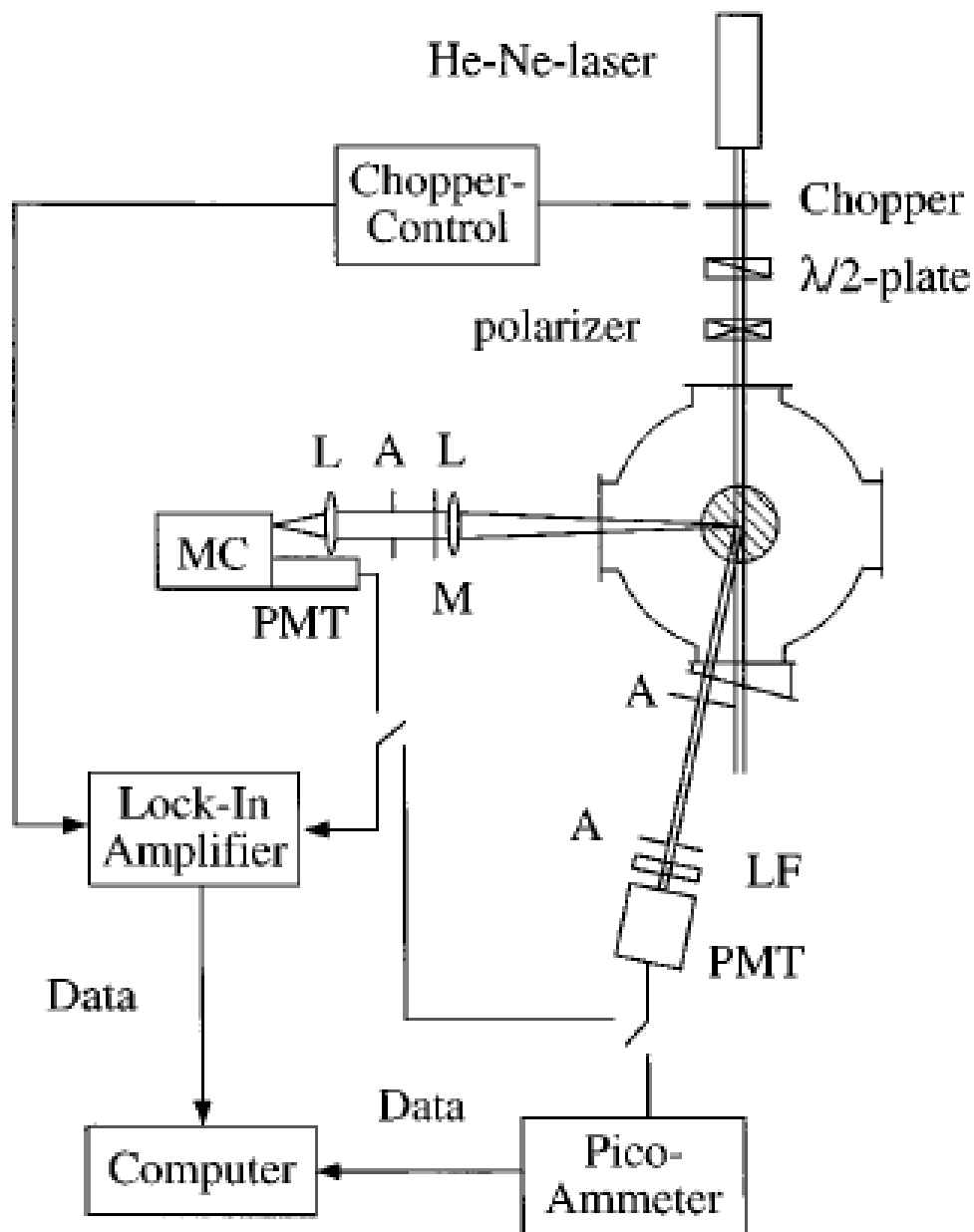
отношения асимметрии $I(a_d, \alpha_1, \perp) / I(a_d, \alpha_2, \perp)$ для алюминиевых сфер в вакууме и для полистирольных латексных сфер в воде, соответственно, в обоих состояниях поляризации.

На рисунке 1.6 представлена схема экспериментальной установки для определения параметров частиц в плазме на основе измерения интенсивности рассеянного света на двух углах.

Оптическая система для измерения светового сигнала на 90° состоит из двух фокусирующих линз, отверстия, трех зеркал и монохроматора. Рассеянный свет детектируется ФЭУ в термоэлектрически охлаждаемой камере. Интенсивность рассеянного света на 12° определяется с использованием компактного ФЭУ трубки. Он состоит из двух 1.5 мм отверстий, разделенных 30 мм и фильтра для 632,8 нм лазерной линии, соединенных с входным окном трубки фотоумножителя с помощью резьбовых стержней. Обе оптические системы ориентированы к центральной оси зазора между электродами, так что линии визирования пересекают лазерный луч в одной и той же позиции. Для сбора данных используется цифровой синхронный усилитель. Для того чтобы получить одновременное измерение на двух углах использовано специальное программное обеспечение, позволяющее вести одновременный сбор данных с синхронным усилителем.

Эти расчеты дают значения диаметров рассеивающих частиц, зная которые можно вычислить и их числовую плотность. На рисунке 1.5 также показана зависимость соотношения поляризационной асимметрии $I(a_d, \alpha_1, \perp) / I(a_d, \alpha_1, \parallel)$ в зависимости от размера частиц для алюминия и частиц полистирола, соответственно. В то время как соотношение равно 1 для поляризационной асимметрии при 12° на всем диапазоне размеров, соотношение поляризации асимметрии при 90° изменяется на несколько порядков для частиц с диаметром до 400 нм. Потенциальным осложнением в интерпретации угловой или поляризационной асимметрии измерений является то, что одно значение соотношения асимметрии часто наблюдается для различных диаметров частиц. В зависимости от ситуации желательно иметь другие измерения, чтобы избежать двусмысленности.

Уравнение (1.4) показывает, что интенсивность рассеянного света зависит не только от размера и плотности исследуемых частиц, но также и от экспериментальных параметров, т.е. рассеивающего объема, расстояния между рассеивателем и детектором, интенсивности падающего пучка и длины волны. Рассеивающий объем и расстояние до детектора различны для обоих оптических устройств двух углов в установке на рисунке 1.6 и могут быть трудно вычислимыми. Обнаруженные сигналы фототоков генерируемых в фотоэлектронных умножителях зависят и от поляризации падающего света.



МС: монохроматор; PMT: фотоумножитель; А: Диафрагма; L: линзы; М: зеркало; LF: лазерный фильтр

Рисунок 1.6 - Вид сверху на разрядную камеру и систему рассеяния лазерного света

Другим фактором, влияющим на обнаруженные сигналы, является чувствительность принимающей электроники. Для количественных результатов, следовательно, необходимо получить коэффициент абсолютной асимметрии путем калибровки обнаруженной интенсивности. Источник света известной интенсивности должен быть использован для получения калибровочных коэффициентов для обнаруженных сигналов. В своих

исследованиях авторы работы [21] выполняли калибровку посредством некоторого стандартного рассеяния, представляющего собой в их случае рассеяние в водной суспензии полистирол латексных сфер известных размеров и плотности. Этот подход имеет то преимущество, что используются те же настройки с одинаковой геометрией лазерного луча и идентичных отверстий детекторов для калибровочного эксперимента с полистирол латексными сферами и для реального эксперимента с пылевыми частицами, генерируемыми в плазме.

Вернемся к определению калибровочных коэффициентов. Для известных размеров и концентрации частиц рассеянные интенсивности могут быть вычислены из Ми теории. На основе уравнения (1.4) определялись калибровочные коэффициенты, которые связывают интенсивность сигнала I с плотностью n_d и диаметром d . Для измеренных сигналов на каждом угле можно определить:

$$I_{12^\circ_\perp} = \alpha_{12^\circ} \sigma_{scatt}(a_d, 12^\circ, \perp) I_0 n_d \Delta V_{12^\circ} = c_{12^\circ_\perp} \sigma_{scatt}(a_d, 12^\circ, \perp) n_d, \quad (1.8)$$

$$I_{90^\circ_\perp} = \alpha_{90^\circ} \sigma_{scatt}(a_d, 90^\circ, \perp) I_0 n_d \Delta V_{90^\circ} = c_{90^\circ_\perp} \sigma_{scatt}(a_d, 90^\circ, \perp) n_d, \quad (1.9)$$

где $c_{\alpha_\perp} = \alpha_{90^\circ} I_0 \Delta V_{90^\circ}$, а α_{90° и α_{12° являются коэффициентами пропорциональности между интенсивностями рассеянного света и измеренного фототока $I_{12^\circ_\perp}$. В первую очередь в процессе калибровки определяют значения калибровочных коэффициентов в экспериментах с эталоном, т.е. с частицами известной концентрации и размеров, а далее, зная эти калибровочные коэффициенты, уже можно определить угловые соотношения асимметрии и через них размер и концентрацию рассеивающих частиц в исследуемых системах.

Исследование структурных, динамических и транспортных свойств плазменно-пылевых образований в ВЧ разряде интенсивно проводится во многих научных лабораториях, как в земных условиях так и в условиях микрогравитации [31-34]. Методы исследования – самые разные, контактные и бесконтактные. Благодаря своим размерам пылевые частицы могут быть сняты видеокамерой, что позволяет проводить изучение и анализ многих свойств пылевой плазмы на основе реальных временных конфигураций и траекторий. Это служит основой для так называемой бесконтактной (пассивной) диагностики пылевой плазмы, которые не вносят возмущений в исследуемую систему. Математическая обработка данных, полученных из видеозаписи пылевых структур, с помощью известных методов, используемых в методах компьютерного и математического моделирования многочастичных систем. Например, формулы для расчета транспортных коэффициентов с помощью автокорреляционных функций динамических переменных, основанные на выводах теории Грина-Кубо [35-38]. Один из пассивных бесконтактных методов определения параметров пылевой плазмы предложен в [39]. Этот

метод опирается на результаты численного моделирования динамики частиц в трехмерных системах с экранированным взаимодействием. Сравнение экспериментальных данных с результатами численного моделирования позволяет провести идентификацию значений параметров пылевой плазмы, при которых результаты теории и эксперимента совпадают. Таким образом, происходит восстановление параметров, напрямую не измеренных в эксперименте, например заряда пылинок.

В последние годы значительное внимание было уделено экспериментальному исследованию пылевой плазмы в условиях микрогравитации [33-34]. В этих опытах на борту МКС были также получены оригинальные пылевые структуры.

Такие эксперименты позволяют исследовать процессы, которые не наблюдаются в земных лабораториях: зарядка частиц в результате фотоэмиссии, происходящей в верхних слоях атмосферы, формирование войдов, образование больших частиц, свыше 100 мкм, возникновение войда, свободной от пылевых частиц центральной области разрядного пространства и т.д.

Так, в работе [34, с.2] описаны эксперименты по изучению динамики частиц на борту космической станции Мир, выполненные в течение 28-й орбитальной экспедиции. Были измерены температура, концентрация, парная корреляционная функция, коэффициент диффузии при различных параметрах разряда, был получен плазменный кристалл.

В работах [35-36] были вычислены и исследованы транспортные характеристики системы макрочастиц в ВЧ разряде с помощью броуновской динамики частиц.

Наряду с описанным выше, другим методом бесконтактной диагностики является оптико – спектроскопическая диагностика. Важность освоения оптической диагностики заключается в том, что данный метод позволяет получить обширную информацию о параметрах пылевой плазмы (температура и концентрация частиц плазмы) и достичь углубленного понимания физических процессов в системе. В отличие от традиционных методов диагностики (например, зондовой), оптическая диагностика является бесконтактной и позволяет с высокой степенью точности определить ряд важных физических параметров, таких как температура и концентрация электронов. В рамках исследования данной диссертации предпочтение отдается именно этому методу диагностики плазменно-пылевых структур.

В работе [40] представлено детальное исследование структурных характеристик тонких пленок, нанесенных с использованием пылевой плазмы радиочастотного разряда в смеси SiH_4 и Ar, с помощью просвечивающей электронной микроскопии и спектроскопии комбинационного рассеяния полиморфного кремния. Прямоугольная модуляция температуры плазмы и газа варьировалась для получения пленок с различными наноструктурами. Просвечивающая электронная микроскопия и электронная дифракция показали наличие кристаллитов Si около 2 нм в силан-водородных пленках, что связано с формированием наночастиц из плазменного газа, т.е. с наличием различных

стадий роста, названных нуклеацией частиц и их коагуляцией. Комбинационное (рамановское) рассеяние было использовано для исследования этапа формирования наноструктурированных пленок в процессе кристаллизации, индуцированного лазерным нагревом.

В работе [41] нестабильность в электрических сигналах разряда была использована как метка для обнаружения конца формирования наночастиц монокристаллического кремния (нуклеации) в Ar/SiH_4 плазме ВЧ разряда. Сканирующая электронная микроскопия и атомно-силовая микроскопия пленочных отложений показали, что точное начало фазы коагуляции соответствует началу неустойчивости. В конце нестабильности монокристаллических наночастиц практически не остается в газовой фазе. Эти результаты, основанные на непertурбативном методе, позволяют контролировать отложения монокристаллического кремния наночастиц с четко определенным распределением размеров.

Кинетика многоступенчатого процесса зарождения и роста частиц в SiH_4 - Ar плазме низкого давления ВЧ-разряда была исследована в работе [42]. Рост частиц рассматривается в аналитической модели в виде цепочки реакций с участием отрицательных ионов и молекул с возбужденными колебательными уровнями. В рамках этой модели было объяснено ограничение размера частиц первого поколения, а также сильное влияние температуры на рост кластеров. Была разработана теория критических явлений кластерных захватов в разрядах для описания выбора нейтральной частицы по размеру, и увеличения концентрации частиц в течение периода, превышающего время пребывания в плазме. Наконец, аналитическая модель, описывающая критические явления коагуляции частицы и ее влияние на параметры плазмы, была развита для объяснения последних экспериментальных результатов на сверхмалых 2-10 нм кластерах. Все теоретические результаты представлены в сравнении с соответствующими новыми экспериментальными данными и с результатами компьютерного моделирования.

В статье [43] рассматривается формирование наночастиц в импульсном разряде. Эксперименты проводились в емкостном разряде смеси аргона и ацетилена. В работе особое внимание уделено исследованию влияния частоты импульсов на образование пыли. Эксперименты показывают существование довольно узкой полосы частот, которая отделяет область частот, без образования пыли от области частот, где происходит образование пыли. Решающим моментом в наблюдениях явилось то, что небольшое изменение частоты импульсов (от 700 до 725 Гц) достаточно, чтобы вызвать или, соответственно, подавить образование пыли. Экспериментальные результаты обсуждаются с помощью простой модели, которая позволяет рассчитать плотность отрицательных ионов (C_2H^- , C_4H^- и т.д.) в зависимости от частоты импульсов.

Обзор современного состояния проблемы получения наноструктур, нанокластеров и композитных материалов с помощью плазменных методов показывает актуальность исследований в данном направлении. Так же нужно

отметить, что новые методы основанные на применении пылевой (комплексной) плазмы все еще требуют дальнейшего изучения и доработок.

В данной диссертационной работе основной акцент был сделан на исследовании диффузионных, структурных и спектральных характеристиках пылевой плазмы, генерируемой в ВЧ-разряда, а также влияния частиц пыли на свечение плазмы. Исследования были выполнены на основе бесконтактных методов. Транспортные и структурные свойства были исследованы с помощью анализа видеозаписей плазменно-пылевых структур, в то время как спектральные характеристики буферной плазмы были исследованы путем анализа спектров свечения плазмы, а исследование роста пылевых частиц в смеси аргона и ацетилена с помощью метода много углового рассеяния.

1 MODERN STATE OF ISSUE

Interest in dusty plasma has grown significantly over the last two decades that have passed since the time when dust crystals in plasma was first observed independently by G.Morfill with colleagues in Germany [1] and by J. Lin I Chu from Taiwan [2].

Dusty plasma by definition is a system in which there are micron sized solid particles in a plasma environment. The combined action of interparticle interaction forces with dissipation processes can lead to formation of ordered plasma-dust structures similar to liquid or solid. Levitation of the dust particles in the plasma occurs when the charged dust particles are trapped in the potential wells created by specific distributions of the electric field in the plasma [4-6].

It should be noted that the particles are not only be injected into the plasma environment, but may also be independently formed therein due to accumulation of nanoclusters and spray products at the surface of the electrodes or chamber, as well as after the plasma-chemical reactions in the reactive gas . Dusty plasma also meets in high-energy installations of the synthesis in the wall region, in industrial reactors, in micro and nanoelectronics, in research booths, in space, etc.

From a practical standpoint, the most important studies are those that are associated with RF discharges. This is due to the widespread use of radio frequency discharge in many technological applications such as materials processing, microelectronics and plasma industrial setups [3,11,12]. Thus it is very important to understand the behavior of dust particles in rf discharge and the influence of dust particles on plasma parameters and vice versa.

The main methods of dusty plasma diagnostics can be distinguished the methods on the basis of light scattering , photon- induced processes and emission spectroscopy. Light scattering is easy to implement experimentally, so this method is widely used in the experiment. However, to obtain quantitative data from measurements of the light scattering, it is difficult to implement. At the beginning of this century, Rayleigh and Mie developed a complete theory of light scattering objects much smaller than the length of the scattered light (Rayleigh scattering) , or comparable with the wavelength (Mie scattering) . Full description of the developed theories can be found in monographs of van der Hulst [15] and Bohren [16]. The most important exactly soluble problem in the theory of scattering by small particles is that for a sphere. Although the formal solution of this problem has been known for many years, practically for the calculations it was used with the computers appearance. In 1908, Mie developed the theory in an effort to understand the varied colors in absorption and scattering exhibited by small colloidal particles of gold suspended in water. The theory of scattering and absorption by small spherical particles has received the common name " Mie theory ." Detailed history of the problem for a sphere is given in [17].

In addition to the above, another method of contactless diagnostics is the optical - spectroscopic diagnostics. The importance of development of optical diagnostics is that this method allows to obtain extensive information on dusty plasma parameters

(temperature and concentration of particles in the plasma) and achieve a deeper understanding of the physical processes in the system.

The present state of the problem of obtaining nanostructures, nanoclusters and composite materials using plasma methods shows relevance of research in this direction. Also need to note that the new methods based of application of dusty (complex) plasma still require further study and improvements.

In this thesis the main focus was on the study of diffusion, structural and spectral characteristics of dusty plasma generated in the RF discharge, and the effect of influence of dusty particles on the plasma glow. Studies have been performed on the basis of non-intrusive methods. Transport and structural properties have been investigated by analysis of videos of dust structures, the spectral characteristics of buffer plasma were investigated by the plasma emission spectrum analysis and the study of growth of dust particles in the mixture of argon and acetylene by the multi-angle scattering method.

1. CARACTERE INNOVANT DU DOMAINE DE RECHERCHE

L'intérêt dans le plasma poussiéreux a considérablement augmenté au cours des deux dernières décennies qui se sont écoulées depuis l'observation des cristaux coulombiens formés par les particules de poussière piégées dans le plasma réalisée, de façon très indépendante, par le Professeur G. Morfill et son équipe au Max Planck Institute de Garching en Allemagne [1] et par le Professeur J. Lin je Chu de l'université de Chungli à Taiwan [2].

Le plasma poussiéreux, par définition, est un système dans lequel il existe des particules solides, dont les tailles se situent entre quelques nanomètres et quelques micromètres, dans un environnement plasma. L'action combinée des forces d'interactions inter-particules avec les processus de dissipation peut conduire à la formation de structures ordonnées plasma-poussière similaires à celles d'un liquide ou d'un solide. La lévitation des particules de poussière dans le plasma se produit lorsque les particules de poussière chargées sont piégées dans les puits de potentiel créés par les distributions spécifiques du champ électrique dans le plasma [4-6].

Il convient de noter que les particules ne sont pas seulement injectées dans le plasma, mais peuvent également y être formées du fait de l'accumulation des nanoclusters, des produits de pulvérisation à partir de la surface des électrodes et des parois du réacteur ou à partir de réactions chimiques dans le plasma lorsqu'un gaz réactif est utilisé. Les plasmas poussiéreux peuvent également être observés dans les installations où de haute énergie sont mises en œuvre, dans les réacteurs industriels utilisés en micro et nanoélectronique, dans les réacteurs de recherche, dans l'espace (atmosphères de planètes, queues de comètes...), etc.

D'un point de vue pratique, les études les plus importantes sont celles liées à des décharges RF. Cela est dû à l'utilisation généralisée de ce type de décharge dans de nombreuses applications technologiques telles que le traitement des matériaux, la microélectronique etc. [3, 11, 12]. Ainsi, il est très important de comprendre le comportement des particules de poussière dans une décharge haute fréquence et leur influence sur les paramètres du plasma, et vice versa.

Parmi les principales méthodes de diagnostic du plasma poussiéreux on peut distinguer les méthodes basées sur la diffusion de la lumière, les processus induits par photons et spectroscopie d'émission. La diffusion de la lumière laser est facile à mettre en œuvre expérimentalement. C'est pour cette raison qu'elle est largement utilisée. Cependant, les modèles théoriques pour obtenir des données quantitatives à partir des mesures sont assez difficiles. Au début du siècle dernier, Rayleigh et Mie ont développé une théorie complète décrivant la diffusion de la lumière par des objets bien plus petits que la longueur de la lumière diffusée (régime de Rayleigh), soit comparable à la longueur d'onde (diffusion Mie). Une description complète des théories développées peut être trouvée dans les ouvrages de van der Hulst [15] et Bohren [16]. Le problème exactement soluble le plus important dans la théorie de la diffusion correspond aux petites particules sphériques. Bien que la solution formelle de ce problème soit connue depuis de nombreuses années, pratiquement pour les calculs, il a fallu attendre l'apparition de l'ordinateur. En 1908, Mie a développé sa théorie dans le but de comprendre les différentes couleurs de l'absorption et de la dispersion de la lumière par de petites particules d'or en suspension dans l'eau. La théorie de la diffusion et de l'absorption par de petites particules sphériques a reçu le nom commun "de la théorie de Mie". L'histoire détaillée du problème pour une sphère est donnée dans la référence [17].

Une autre méthode de diagnostic sans contact largement utilisée est la spectroscopie optique d'émission. L'importance du développement de ce type de diagnostics optiques est qu'elle permet d'obtenir des informations détaillées sur les paramètres du plasma poussiéreux (température et concentration électroniques dans le plasma) et de parvenir à une meilleure compréhension des processus physico-chimiques.

L'état actuel du problème de l'obtention de nanostructures, de nanoparticules et des matériaux composites en utilisant des méthodes de plasma montre la pertinence de la recherche dans cette direction. Il est important également de noter que les nouvelles méthodes basées sur l'application de plasma poussiéreux (complexe) nécessitent encore des études et des améliorations.

Dans cette thèse, l'accent a été mis sur l'étude de la diffusion multi-angles de la lumière laser, les caractéristiques structurales et spectrales de plasma poussiéreux généré par décharge électrique RF et l'influence des particules de poussière sur l'émission du plasma. Des études ont été réalisées sur la base de méthodes non invasives. Le transport et les propriétés structurales du nuage de particules ont été étudiées par analyse des images vidéos, les caractéristiques spectrales du plasma dans lequel sont piégées les particules ont été étudiées par l'analyse du spectre d'émission du plasma et l'étude de la croissance des particules de poussière dans le mélange de gaz argon-acétylène par la diffusion multi-angle.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ ПО ИЗУЧЕНИЮ СВОЙСТВ ПЫЛЕВОЙ ПЛАЗМЫ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО РАЗРЯДА

2.1 Экспериментальная установка по изучению структурных, динамических и оптических свойств пылевой плазмы высокочастотного разряда

2.1.1 Описание экспериментальной установки

Для исследования свойств пылевой плазмы была использована экспериментальная установка на основе емкостного высокочастотного разряда. Фотография экспериментальной установки представлена ниже на рисунке 2.1. Подробное описание дано в работах [44-46].



Рисунок 2.1 – Фотоизображение экспериментального стенда на основе высокочастотного емкостного разряда для генерации плазменно-пылевых структур

На рисунке 2.2 представлена принципиальная диаграмма экспериментального стенда.

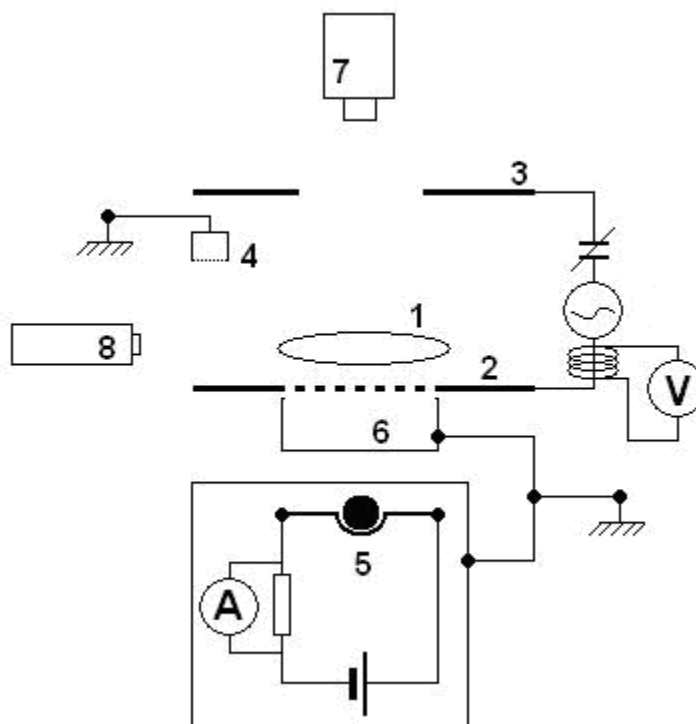


Рисунок 2.2 – Принципиальная диаграмма экспериментальной ВЧ установки

Экспериментальная установка в целом включает в себя следующие элементы:

1. ВЧ – камера. Она изготовлена из нержавеющей стали в виде цилиндрической трубы. Объем камеры составляет примерно 20 литров, внутри нее расположены два плоских электрода в виде диска диаметром 10 см, сделанные из нержавеющей стали. Для удобства камера оснащена стеклянными окошками (иллюминаторами) с трех сторон, которые дают возможность освещать пылевые структуры, а также наблюдать их и регистрировать.

2. Вакуумная система. Была задействована специальная установка низкого давления ВУП-5 (Вакуумный универсальный пост). Основными элементами ВУП-5, задействованными в данном эксперименте, являются форвакуумные и диффузионные насосы с водным охлаждением и датчики давления. Управление вакуумной системой полностью автоматизировано.

3. ВЧ – генератор ($f=13.56$ МГц) мощностью $W=0 \div 50$ Вт.

4. Система измерения давления рабочего газа в ВЧ – камере. Для этого использовалось специальное оборудование «САПФИР-22МТ», предназначенное для измерения давления низкого диапазона.

5. Система иллюминации. Система иллюминации содержит: 1) твердотельный лазер зеленого спектра с диодной накачкой и мощностью 250 мВт; 2) Оптическая система, состоящая из телескопа для расширения лазерного

пучка, а также из цилиндрической линзы, которая обеспечивает «лазерный нож».

6. Система регистрации. Для этого использовалась скоростная CCD камера (25 кадр/секунд) которая записывает видеоизображения пылевых структур.

7. Система сохранения видео изображения и их обработка (оцифровка), «база данных». Для этого использовался мощный персональный компьютер со специальной встроенной платой видео захвата (Pinnacle Studio 9).

8. Контрольно измерительные приборы (осциллограф, вольтметр, амперметр).

В вакуумной камере разряд ёмкостного типа мощностью до 20 Вт при давлениях от 0.1 до 2 торр поддерживается с помощью высокочастотного генератора ($f = 13,56$ МГц), который подсоединен к нижнему электроду через блок связи и соединительную самосогласующуюся емкость.

Разряд наблюдается между двумя параллельными электродами на расстоянии между электродами до 2 см (рисунок 2.3). Нижний электрод всегда выполняется в виде диска, а верхний – в виде кольца, либо в виде сетки. Разряд создается в инертном газе при давлениях от 10^{-1} до единиц торр. Подаваемая в ВЧ- разряд мощность оценивается по порядку величины в 1-15 Вт. Пылевые частицы со средними размерами 5-120 мкм инжектируются с помощью контейнера над плазмой.

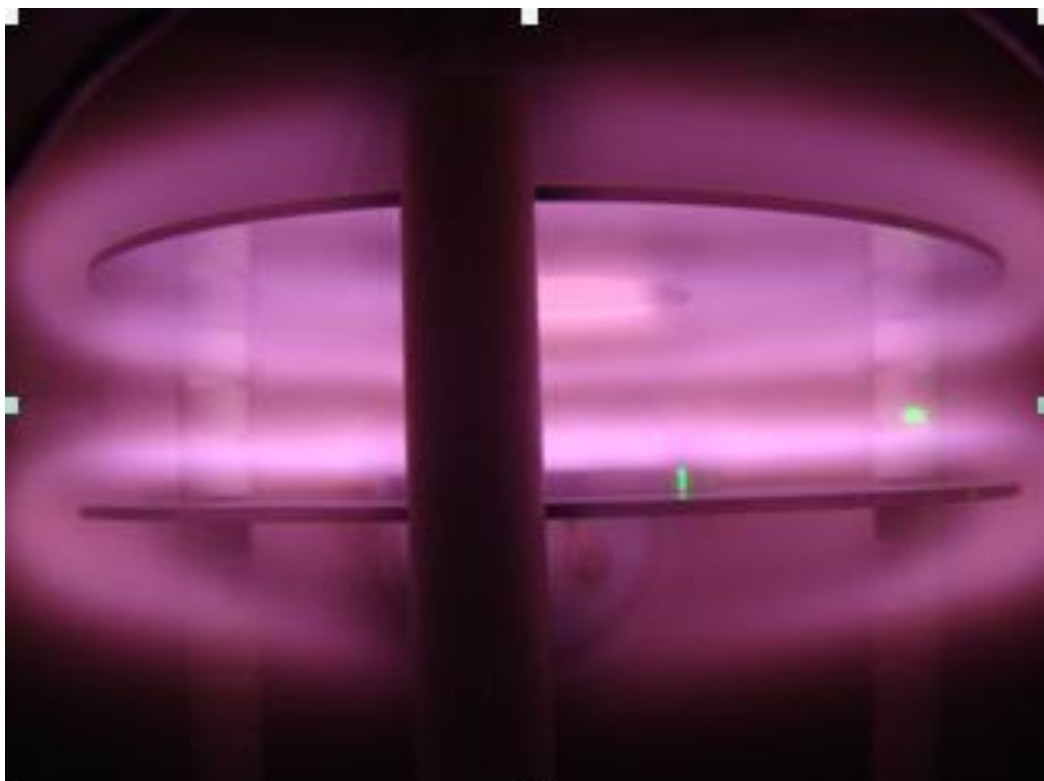


Рисунок 2.3 - Экспериментальная установка в рабочем режиме

Для визуализации пылевых частиц использовалась подсветка в горизонтальной или вертикальной плоскостях с помощью зондирующего лазерного луча, который с помощью линзы создавал плоский лазерный «нож» толщиной около 300 микрон (рисунок 2.4). Рассеянный свет регистрируется ПЗС видеокамерой. Видеоизображения, полученные с помощью видеокамеры, сохраняются в памяти компьютера для последующей обработки с помощью специальных пакетов программного обеспечения.

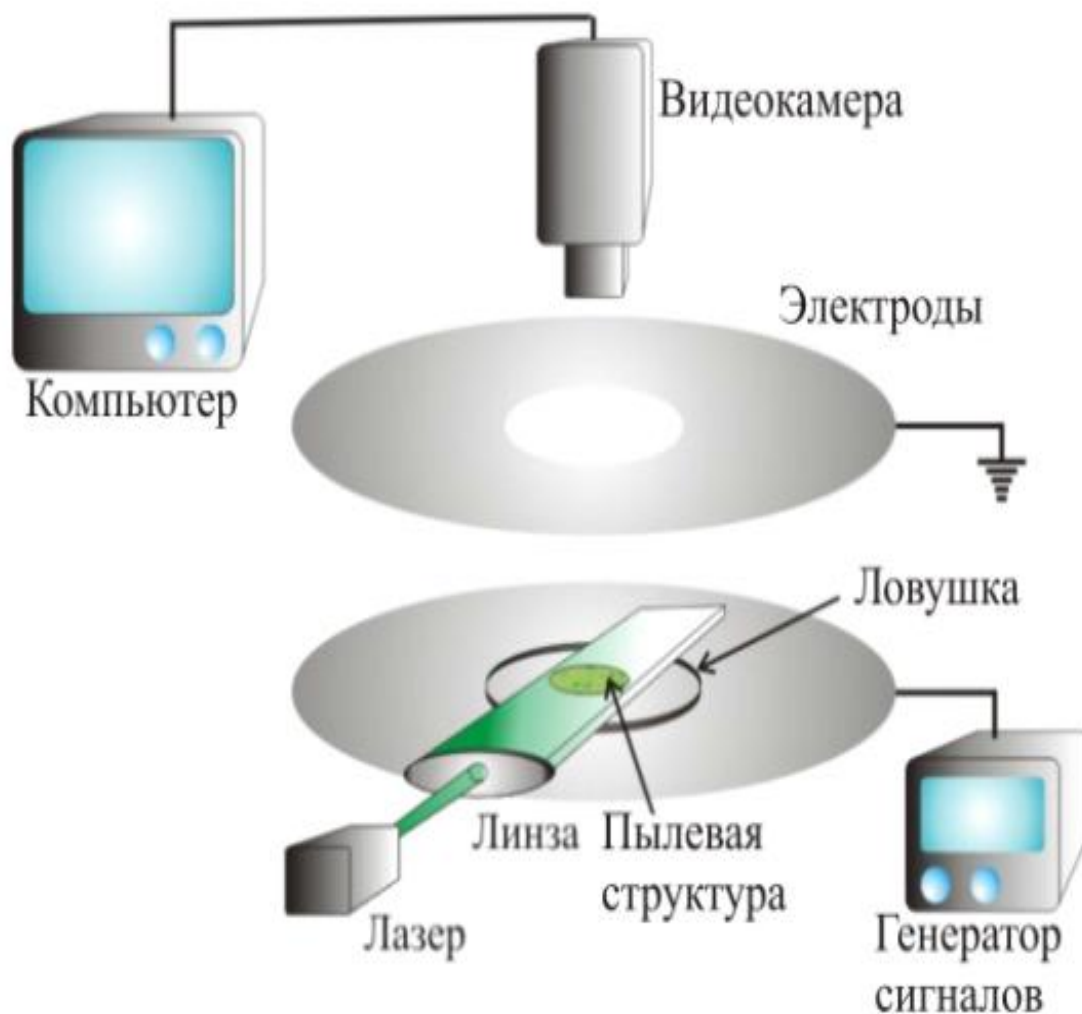


Рисунок 2.4 – Описательная схема работы экспериментальной установки

2.1.2 Исследование структурных свойств плазменно-пылевых образований в емкостном высокочастотном разряде

Экспериментальная установка на основе ВЧ-разряда была использована для выполнения всех экспериментов. Эксперименты проводились в плазме аргона. В качестве частиц пыли использовались полидисперсные частицы Al_2O_3 со средним диаметром $4\text{ }\mu\text{m}$. Регистрация пылевых структур, освещенных горизонтально сфокусированным лазерным лучом (ножом), была реализована с помощью высокоскоростной видео камеры (Fast Video V250). Для эффективности была использована аналоговая черно-белая видеокамера.

Изображения с камеры записывались в файл на компьютер с помощью платы видеозахвата компании Pinnacle Systems. Так же для удобства работы стенд был оснащен черно-белым видеомонитором.

В эксперименте при определенных параметрах разряда пылевые частицы левитируют над нижним электродом на границе светящейся плазмы и темного приэлектродного слоя. Левитируя, частицы, формируют упорядоченные структуры, имеющие горизонтальный размер до нескольких см, а толщину - всего несколько слоев частиц. Характерное межчастичное расстояние составляет несколько сотен мкм, что позволяет наблюдать эти структуры практически невооруженным глазом и управлять формой и размером структур, изменяя рельеф нижнего электрода.

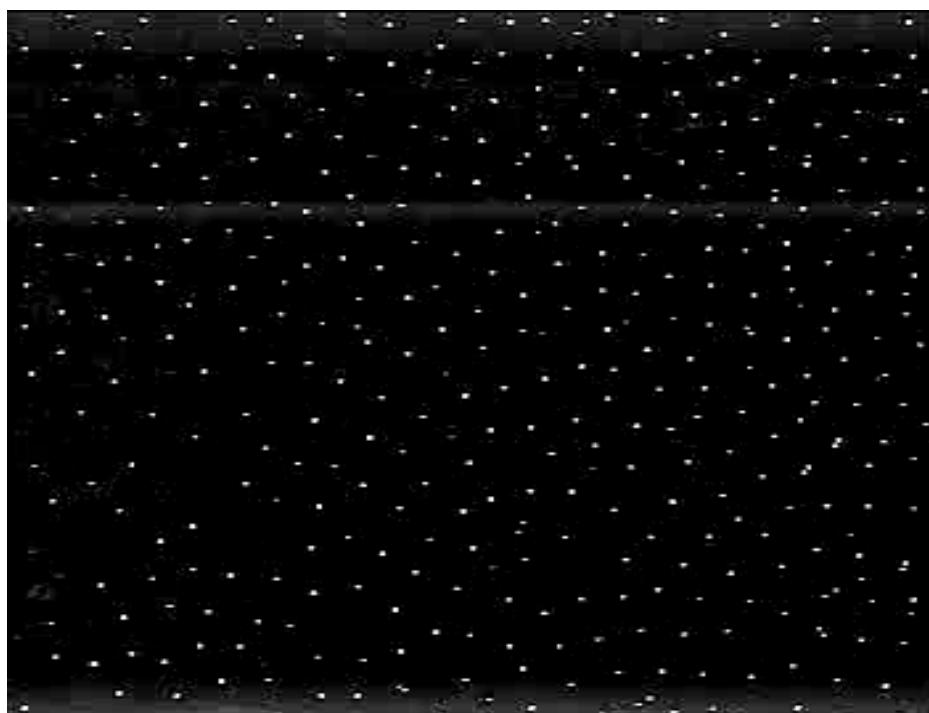


Рисунок 2.5 - Фотоизображение плазменно-пылевых структур образованных в плазме высокочастотного разряда. Давление рабочего газа $p=1$ торр, мощность разряда $P=2$ Вт

Структуры выстраиваются аналогично атомам в кристаллических решетках, т.е. могут иметь кристаллический порядок (рисунок 2.5). На рисунке 2.6 представлено фотоизображение плазменно-пылевой структуры жидкостного типа.



Рисунок 2.6 - Фотоизображение плазменно-пылевых структур, образованных в плазме высокочастотного разряда. Давление рабочего газа $p=0.3$ торр, мощность разряда $P=10$ Вт

Следует отметить, что в лабораторных экспериментах в ВЧ- разряде в наземных условиях реальные трехмерные системы до настоящего времени получить не удалось. Плазменно-пылевые кристаллы в наземных условиях имеют существенно двумерный характер, что напрямую связано с действием силы тяжести.

Целью определения координат и скоростей частиц в плазме является дальнейшее исследование физических свойств пылевой плазмы на основе микроскопических данных, например, определение корреляционной функции распределения частиц. Поэтому важность нахождения координат и скоростей частиц неоспорима.

С этой целью полученные структуры освещались лазерным ножом. Свет, отраженный от частичек, регистрировался с помощью камеры, затем данные записывались на компьютер. После чего эти видеоматериалы с пылевыми частицами обрабатывались. Видеоматериалы разделялись на отдельные кадры и записывались на компьютере с расширением .bmp. Для этого использовалось специальное программное обеспечение VirtualDub v1.5.1. Ниже на рисунке 2.7 представлен интерфейс данной программы во время разделения видео снимков на кадры.

Алгоритм распознавания частиц.

На кадре выбирается пиксель, вокруг которого строятся круг 1 и круг 2. (круг 2 больше круга 1, их радиусы задаются). В круге 1 ищется средняя яркость $F1$, в круге 2 – $F2$. Далее, выбранному пикселю присваивается

переменная $p=F2-F1$. Эта процедура выполняется для каждого пикселя на кадре. Задаются параметры p_0, a_1 и a_2 и находятся связанные области пикселей, для которых выполнено условие $p > p_0$. Каждая такая область (пусть ее размер будет a), для которой выполнено условие $a_1 < a < a_2$, идентифицируется как частица. В качестве координат частицы выбираются координаты пикселя внутри области «а».

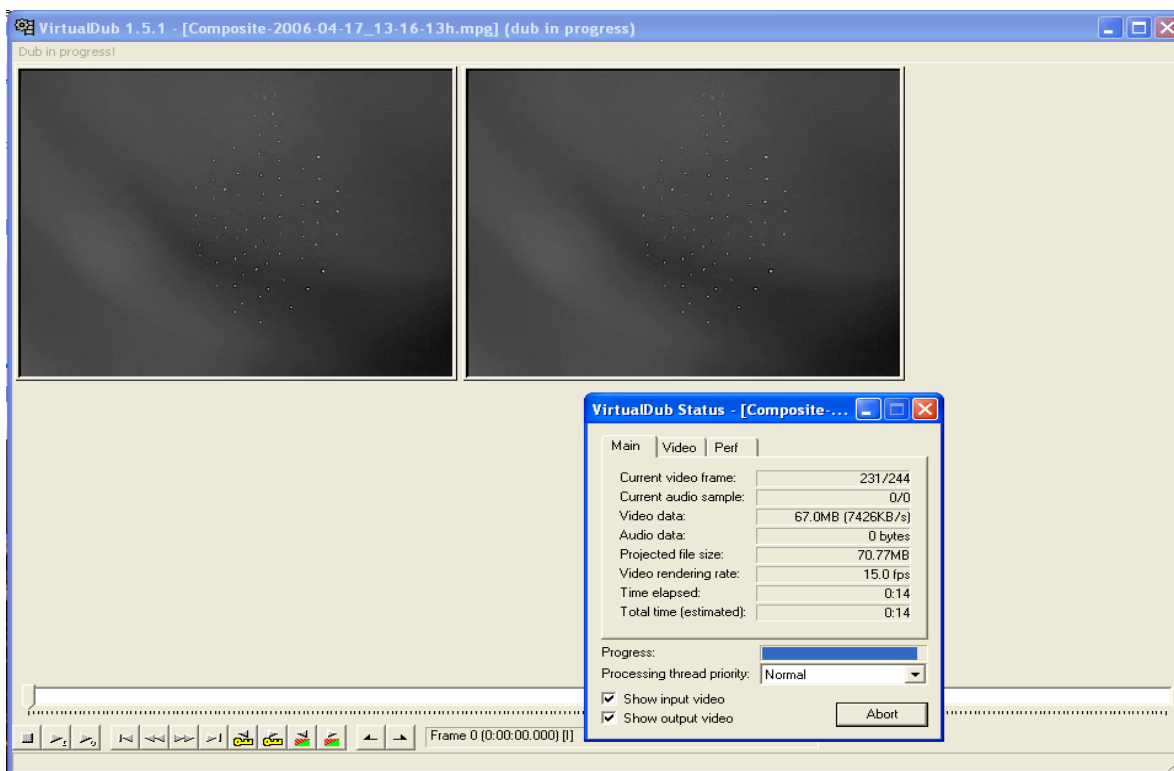


Рисунок 2.7 – Изображения интерфейса программы VirtualDub v1.5.1

2.1.3 Осуществление оптической диагностики

Развитие методов оптико-спектроскопической диагностики плазменно-пылевой среды является важной научной задачей ввиду растущего числа приложений технологий с применением комплексной плазмы в современной микроэлектронике и материаловедении. Важность освоения оптической диагностики заключается в том, что данный метод позволяет получить обширную информацию о параметрах плазмы (температура и концентрация электронов) и достичь углубленного понимания физических процессов в системе. В отличие от традиционных методов диагностики (например, зондовой), оптическая диагностика является бесконтактной и позволяет с высокой степенью точности определить ряд важных физических параметров, таких как температура и концентрация электронов.

В рамках выполнения диссертации с помощью оптико-спектроскопических методов изучены спектроэнергетические характеристики плазмы высокочастотного емкостного разряда при наличии (комплексная плазма) и в отсутствии (буферная плазма) пылевых частиц в среде в зависимости от рабочих режимов ВЧ.

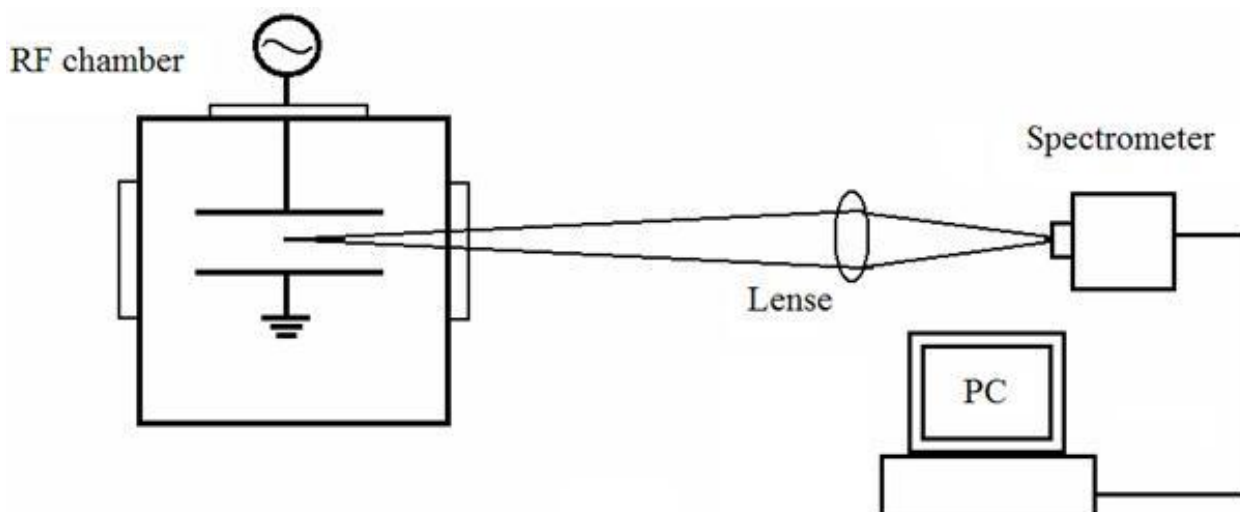


Рисунок 2.8 - Принципиальная схема экспериментальной установки

Принципиальная схема экспериментального стенда по оптико-спектроскопической диагностике плазмы, представляющей собой комбинацию ВЧ установки, описанной в разделе 2.1.1 и оптико-спектроскопической диагностической системы, представлена на рисунке 2.8.

Вакуумная камера имеет боковые оптические окна, через которые ведется наблюдение за процессами, происходящими в разряде. Оптическая система, применяемая для диагностики плазмы, состоит из системы линз и линейного спектрометра Solar S100. Система линз подбирается таким образом, чтобы обеспечить четкое изображение межэлектродного пространства на входной щели спектрометра. Особенность спектрометра Solar S100 - его чувствительность позволяет провести одновременное линейное измерение оптических спектров в диапазоне 190 – 1100 нм.

С помощью оптической системы, состоящей из нескольких линз, на входной щели спектрометра Solar S100 создавалось четкое изображение межэлектродного пространства ВЧ разряда. После зажигания разряда происходил сброс пылевых частиц, которые формировали плазменно-пылевые структуры. В процессе проведения экспериментальной работы были получены спектры буферной плазмы при различных параметрах мощности и давления при наличии частиц и их отсутствии.

2.2 Экспериментальная установка по изучению свойств пылевой плазмы высокочастотного разряда с помощью много углового рассеяния

Экспериментальная установка по изучению свойств пылевой плазмы высокочастотного разряда с помощью много углового рассеяния подробно описана в работе [47]. Общий вид установки представлен на рисунке 2.9. Реактор был разработан специально для изучения формирования частиц в пылевой плазме. ВЧ емкостной реактор имеет два цилиндрических электрода из нержавеющей стали с диаметрами 78 мм и расстоянием между ними 48 мм,

расположенных в шестнадцати угольной вакуумной камере с внутренним диаметром, равным 130 мм.

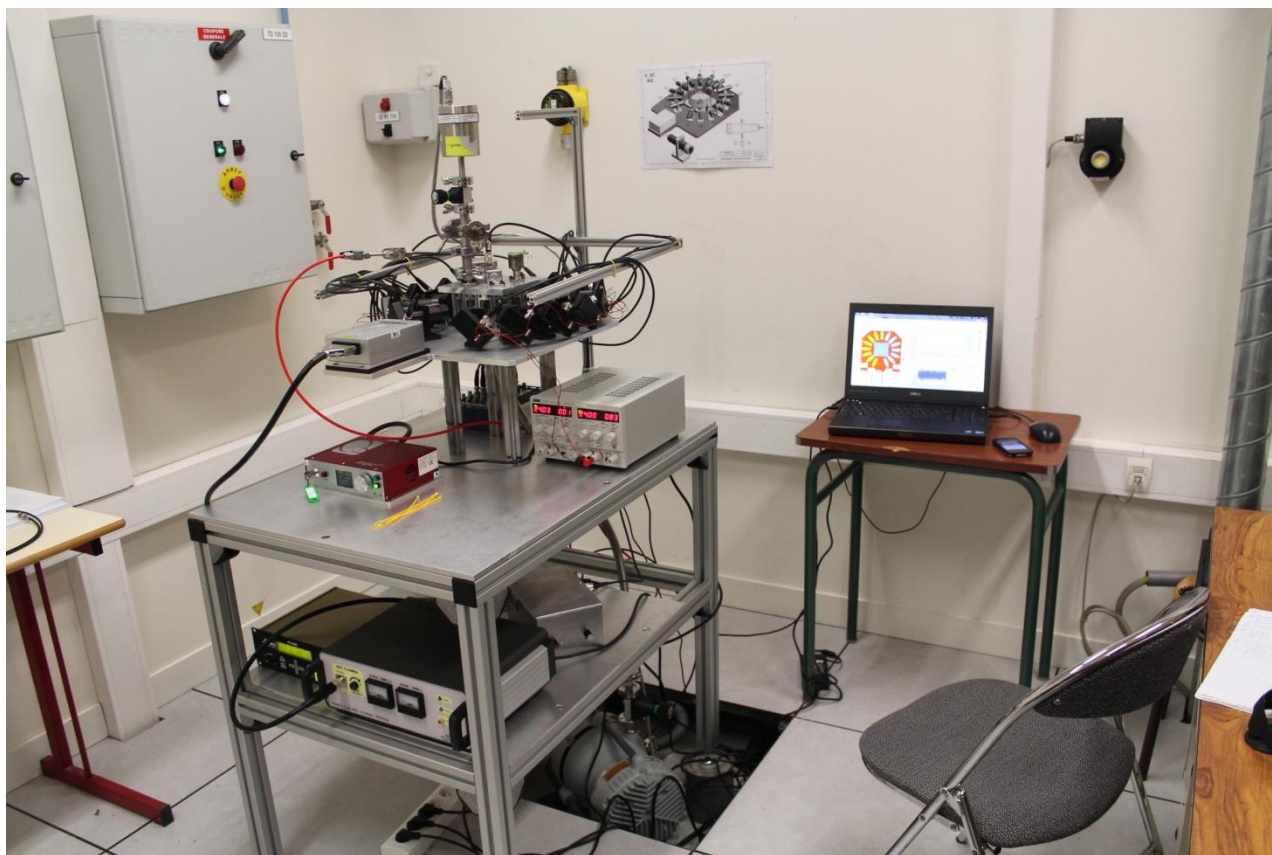


Рисунок 2.9 – Фотография установки по изучению много углового рассеяния света в пылевой плазме ВЧ разряда

Камера имеет 16 окон, 15 из них для диагностики плазменно-пылевых образований с помощью измерений рассеянного лазерного излучения на 15 углах (0° , $22,5^\circ$, 45° , $67,5^\circ$, 90° , $112,5^\circ$, 135° , $157,5^\circ$, $202,5^\circ$, 225° , $247,5^\circ$, 270° , $292,5^\circ$, 315° и $337,5^\circ$) (рисунок 2.10). Нижний электрод заземлен. Верхний электрод соединен с ВЧ генератором (13,56 МГц) и имеет отверстие для притока газа. Система откачки состоит из дроссельного клапана, корневого насоса и циркуляционного насоса. Давление измеряется с помощью емкостного датчика. Кварцевые окна используются, чтобы избежать деполяризации поляризованного лазерного луча.

В качестве источника света в этом эксперименте был использован луч аргонового лазера (532 нм). Он ориентирован, чтобы получить диаметр перетяжки пучка равным 1 мм. Оптическая система диагностики много углового рассеяния лазерного излучения состоит из 14 идентичных симметричных систем обнаружения (7 параллельно с поляризатором и 7 перпендикулярно поляризатору), состоящих из поляризатора, полосового фильтра, собирающих линз и линейно калиброванного кремниевого фотодиода, и одной системы обнаружения, которая стоит на угле 0° без поляризатора (рисунок 2.11). Пересечение луча лазера и телесного угла детектора определяет

рассеивающий объем, расположенный в центре вакуумной камеры, и равный 1мм^3 . Специальное программное обеспечение позволяет проводить одновременный сбор данных от оптических систем на всех углах. Используемый газ – аргон с добавлением ацетилена C_2H_2 (2%). Мощность лазера 0.2 Вт (длина волны 532 нм).

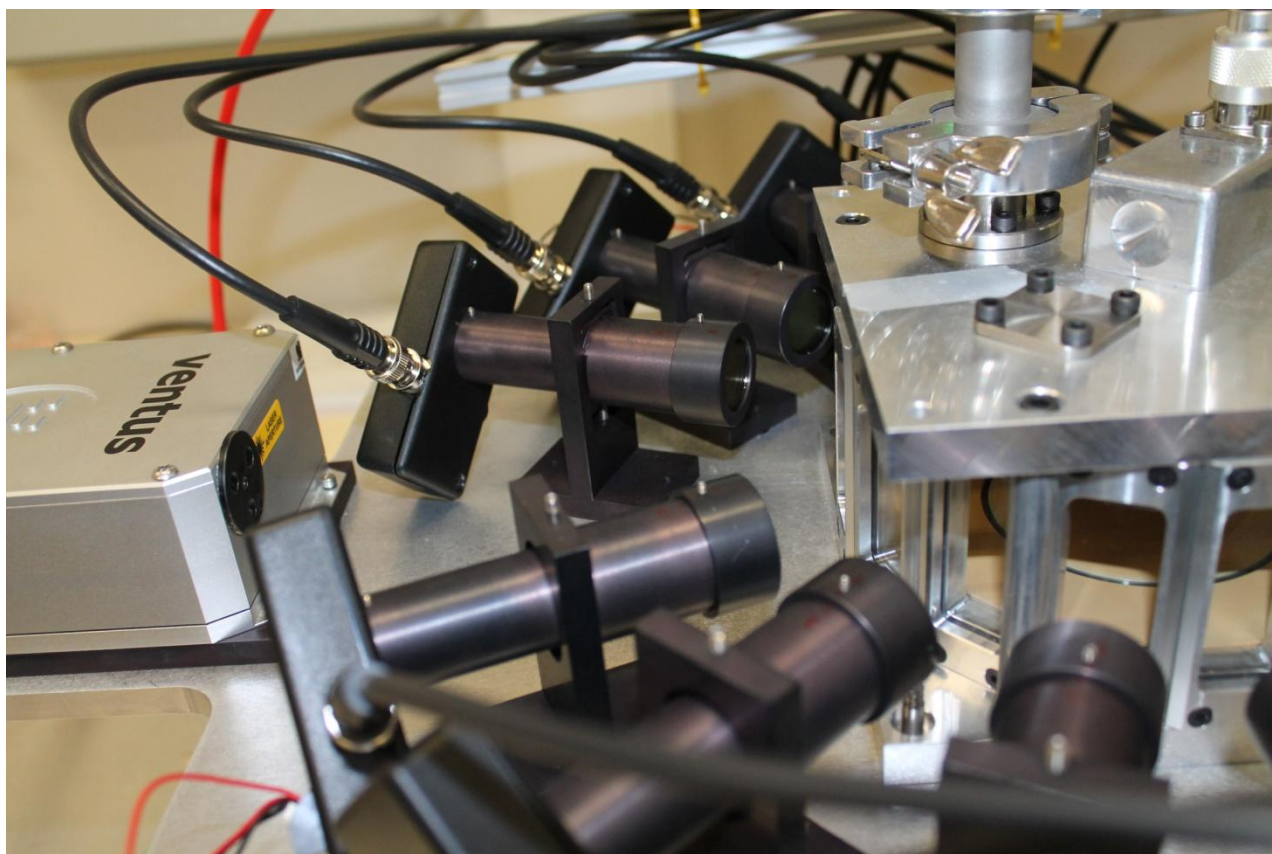
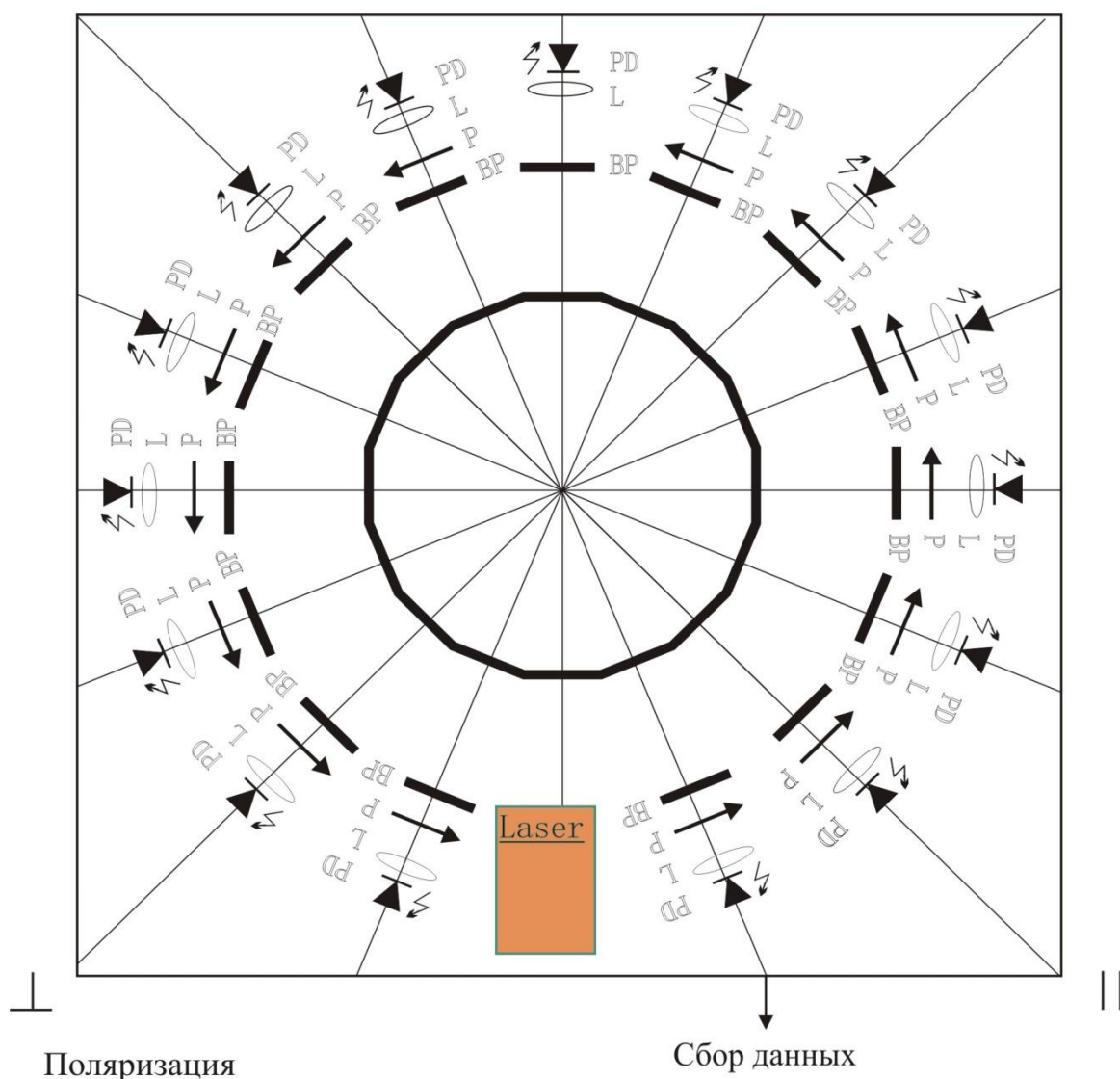


Рисунок 2.10 – Фотография шестнадцати угольной разрядной камеры и оптических систем



PD- фотодиод, L- линза, P- поляризатор, BP- светофильтр

Рисунок 2.11 – Оптическая система экспериментальной установки по многоугловому рассеянию света на плазменно-пылевых образованиях

2 EXPERIMENTAL SETUPS FOR THE STUDY OF PROPERTIES OF DUSTY PLASMA OF RF DISCHARGE

2.1 Experimental setup for the study of structural, dynamical and optical properties of dusty plasma of RF discharge

Study of structural and dynamical properties of dust structures in RF discharge

Experimental setup (RF-setup) is a vacuum chamber with parallel electrodes inside, the upper electrode is grounded and the lower connected to the RF generator. Experiments were performed in an argon plasma. As dust particles it was used the injected Al_2O_3 particles with an average particle diameter $4\text{ }\mu\text{m}$. The dust structures illuminates by a horizontally focused laser beam, using the high-speed video camera (Fast Video V250) the illuminated dust structures were recorded on a computer using a Pinnacle Systems video capture board.

During the experiment it was studied video records of dust structures which were recorded at different parameters of plasma.

Implementation of optical diagnostics

Experimental setup for optical spectroscopic plasma diagnostics is a combination of RF setup described in section above and optical spectroscopic diagnostic system. The vacuum chamber has side optical windows. The optical system used for plasma diagnostics, consists of a lens system and a linear spectrometer Solar S100. The feature of spectrometer Solar S100 - its sensitivity which allows for the simultaneous measurement of linear optical spectra in the range 190 - 1100 nm.

After discharge ignition the dust particles injected which formed the dust structures. During the experimental work the buffer plasma spectra were obtained at different parameters of the power and pressure in the presence of particles and their absence.

2.2 Experimental setup for the study of dusty plasma properties with help of multi-angle scattering

Experimental setup composed from RF-setup and 15 optical systems. RF- setup is a 16 angle vacuum chamber with parallel electrodes inside. It has 16 windows and 15 of them for diagnostics of plasma-dust formation with help of measurements of scattered light on 15 angles (0° , $22,5^\circ$, 45° , $67,5^\circ$, 90° , $112,5^\circ$, 135° , $157,5^\circ$, $202,5^\circ$, 225° , $247,5^\circ$, 270° , $292,5^\circ$, 315° and $337,5^\circ$). The lower rf electrode is grounded. The upper rf electrode connected to RF generator (13,56 MHz) and have a hole for gas influx.

As a light source in that experiment, a laser beam (532nm) was used. The multi-angle laser light scattering diagnostic consists of 14 identical symmetrical detection systems (7 with parallel polarizer and 7 with perpendicular polarizer) composed of a polarizer, a bandpass filter, a collection lens and a linearly calibrated silicon photodiode, and one detection system which stand on angle 0° without polarizer for measurements of extinction. In order to obtain simultaneous measurements at all angles, the special software allows simultaneous data acquisition

from the optics systems at all angles. Used gas – argon with acetylene C_2H_2 (2%). Laser power 0.2 W (wave length 532 nm).

In reactive plasma the dust particles occurs and evolve. During the experiment it was obtained the experimental data on intensities of scattered laser light on dust formation on various angles at different parameters of the power and pressure.

2. MONTAGES EXPERIMENTAUX POUR L'ETUDE DES PROPRIETES D'UN PLASMA POUSSIÉREUX GÉNÉRÉ PAR DÉCHARGE RF

2.1 Montage expérimental pour l'étude des propriétés structurales, dynamiques et optiques de plasma poussiéreux de décharge RF

Étude des propriétés structurales et dynamiques des structures de poussières en décharge RF

Le montage expérimental consiste en une chambre à vide équipée de deux électrodes planes et parallèles à l'intérieur, l'électrode supérieure est reliée à la masse et l'électrode inférieure est reliée au générateur RF par l'intermédiaire d'un circuit d'adaptation d'impédance. Les expériences ont été effectuées dans un plasma d'argon pur dans lequel nous avons injecté des particules d'alumine (Al_2O_3) dont le diamètre moyen est de 4 μm . Les structures formées par les particules de poussière, éclairées au moyen d'une nappe laser dirigée horizontalement, sont enregistrées en utilisant une caméra vidéo à grande vitesse du type Fast Video V250. Les structures de poussières ont été enregistrées sur un ordinateur en utilisant une carte d'acquisition du type Pinnacle Systems.

Nous avons ainsi étudié les enregistrements vidéo de structures de poussières réalisés dans différentes conditions expérimentales.

La mise en œuvre de diagnostics optiques

Le montage expérimental pour le diagnostic du plasma par spectroscopie optique d'émission est une combinaison de la configuration RF décrite ci-dessus et d'un spectromètre du type Solar S100 dont la gamme spectrale se situe entre 190 nm et 1100 nm. La chambre à vide est équipée de hublot pour l'observation du plasma. L'émission du plasma est focalisée sur la fente d'entrée du spectromètre au moyen de lentilles.

Après l'allumage de la décharge les particules sont injectées dans le plasma. Elles forment les structures désirées. Au cours du travail expérimental les spectres des émissions du plasma ont été obtenus pour différentes conditions de puissance RF injectée et de pression, en présence et en l'absence de particules.

2.2 Montage expérimental pour l'étude des propriétés du plasma poussiéreux avec l'aide de la diffusion multi-angle

Le dispositif expérimental utilisé dans cette partie de ma thèse est composé d'une cellule plasma équipée de 16 hublots disposés tous les 22,5° l'un de l'autre. Il est ainsi possible d'enregistrer simultanément l'intensité de la lumière diffusée par les particules suivant 15 angles (0°, 22,5°, 45°, 67,5°, 90°, 112,5°, 135°, 157,5°, 202,5°, 225°, 247,5°, 270°, 292,5°, 315° et 337,5°). Le seizième hublot est utilisé pour le faisceau laser incident. L'angle 0° nous permet de mesurer l'extinction du faisceau direct. Dans ce réacteur, que nous avons construit spécialement pour ce type d'étude, c'est aussi l'électrode supérieure qui est reliée au générateur à travers la boîte d'accord. Le gaz est injecté dans la cellule à travers cette même électrode. Les quatorze autres directions sont divisées en deux groupes à droite et à gauche du faisceau incident. Celles de droite ont la même polarisation que le laser et celles de gauche la polarisation transverse. Chaque système de mesure est équipé d'une lentille qui focalise la lumière, diffusée dans cette direction, sur une photodiode rapide, un filtre de 1 nm de bande passante autour de la longueur d'onde du laser (532 nm) et d'un polariseur. Le laser utilisé est du type

Comme source de lumière dans cette expérience nous avons utilisé un laser du type Ventus de Laser Quantum émettant à une longueur d'onde de 532 nm. La puissance du faisceau incident peut varier de 50 mW à 1 W. Toutes les directions de collecte de la lumière diffusée ont été alignées vers le centre du réacteur de façon à collecter les photons provenant du même volume diffusant. Un facteur de correction a aussi été déterminé afin de corriger les variations

du volume diffusant avec l'angle d'observation. Une carte d'acquisition du type National Instrument permet l'acquisition simultanée de signaux provenant de toutes les photodiodes. Dans le cadre de ce travail de recherche nous avons choisit d'étudier et de suivre en temps réel la formation de nanoparticules dans un mélange gazeux d'argon (98%) et d'acétylène (2%).

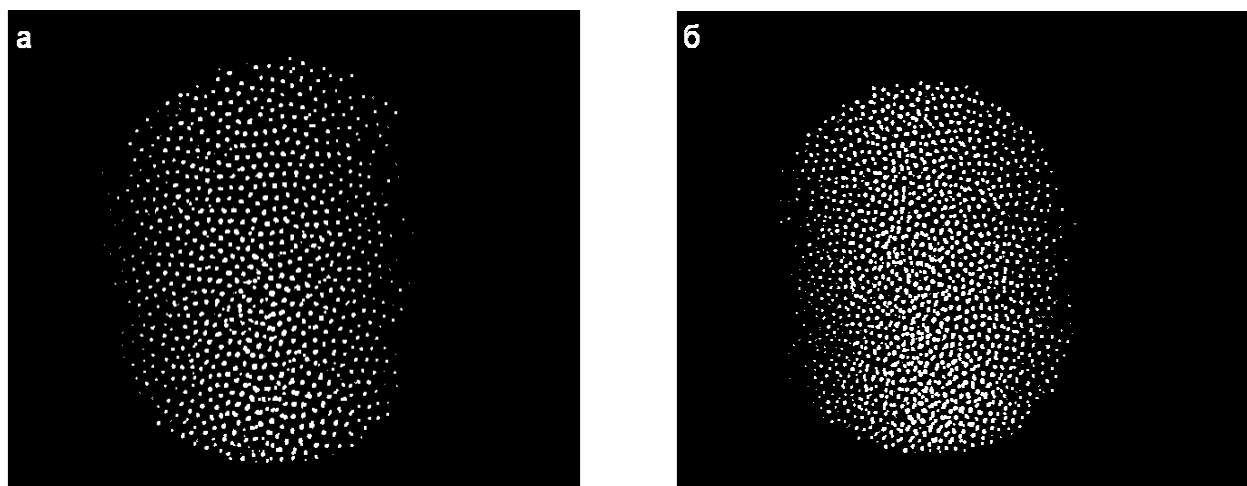
3 ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНЫХ, ДИНАМИЧЕСКИХ, ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПЫЛЕВОЙ ПЛАЗМЫ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО РАЗРЯДА

3.1 Радиальные функции распределения пылевых частиц в высокочастотном разряде

Исследование структурных свойств пылевой плазмы является важной научной задачей, так как позволяет достичь углубленного понимания физических процессов в системе. Структурные свойства пылевой плазмы, созданной в емкостном высокочастотном разряде, исследуются на основе анализа последовательных конфигураций плазменно-пылевых структур, представляющих собой отдельные кадры видеозаписи пылевых структур. Преимущество данного метода заключается в том, что он позволяет получать информацию о системе без внесения возмущений, т.е. является бесконтактным.

Попадая в объем плазмы, как сказано ранее, пылевые частицы образуют слоистую структуру. В одном и том же слое размеры пылинок являются одинаковыми, т.е. в рамках слоя пылинки образуют однородную по своим физическим свойствам систему.

Характерные изображения плазменно-пылевых структур, наблюдаемых в ВЧ-разряде, представлены на рисунках 3.1, а и 3.1, б. Обе пылевые структуры были сформированы при давлении газа $p=0.1$ торр. Рисунок 3.1, а соответствует мощности разряда $W_p = 2.5$ Вт, а рисунок 3.1, б - мощность разряда $W_p = 13.7$ Вт. Было замечено, что значение мощности разряда влияет на структуру пылевого облака.



а) давление газа $p=0.1$ торр, мощность разряда $W_p=2.5$ Вт
б) давление газа $p=0.1$ торр, мощность разряда $W_p=13.7$ Вт

Рисунок 3.1 - Фотоизображения плазменно-пылевых структур, сформированных в плазме высокочастотного разряда

В обоих случаях в горизонтальном слое плазменно-пылевой структуры наблюдается формирование плотной конденсированной системы с высокой степенью пространственной корреляции. При этом можно качественно отметить, что при увеличении мощности ВЧ - разряда упорядоченность пылевых частиц уменьшается.

Для описания структурных особенностей пылевой плазмы были исследованы парные корреляционные функции пылевых частиц при различных значениях мощности разряда. Парные корреляционные функции были получены из анализа траекторий частиц пыли. Как известно, парная корреляционная функция пылевых частиц определяет вероятность нахождения частицы в пределах определенного расстояния по отношению к пробной частице, она является очень хорошим инструментом для оценки структурных свойств пылевой плазмы. В случае изотропной системы парная функция зависит лишь от расстояния между частицами и называется радиальной функцией распределения $g(r)$ (РДФ). Поведение функции распределения зависит от взаимодействия частиц. Там, где взаимодействие стремится к нулю (на больших расстояниях) имеем некоррелированное распределение. Вероятность нахождения частиц на заданном расстоянии принято рассматривать относительно некоррелированного распределения, следовательно, радиальные функции с ростом межчастичного расстояния должны стремиться к единице, т.е. при $r \rightarrow \infty$, $g(r) \rightarrow 1$.

В диссертации выполнены работы по определению экспериментальных парных корреляционных функций распределения пылевых частиц. Для этого с помощью специальной программы на каждом кадре находились координаты частиц в горизонтальном слое (пункт 2.1.2). После чего выполнялся расчет радиальной функции распределения по следующему алгоритму. Для каждой частицы пространство вокруг этой частицы делится на круговые слои толщиной dr и подсчитывается число частиц в каждом слое ΔN (рисунок 3.2). Полученные значения усредняются как по всем частицам данной конфигурации (каждая конфигурация соответствует отдельному кадру), так и по всем конфигурациям.

Радиальная функция распределения вычисляется по формуле

$$g(r) = \frac{1}{n_d} \cdot \frac{\Delta \bar{N}(r)}{\pi dr(2R - dr)} \quad (3.1)$$

где n_d - поверхностная концентрация пылинок на горизонтальном (вертикальном сечении), $\Delta \bar{N}$ - усредненное число частиц в круговом слое.

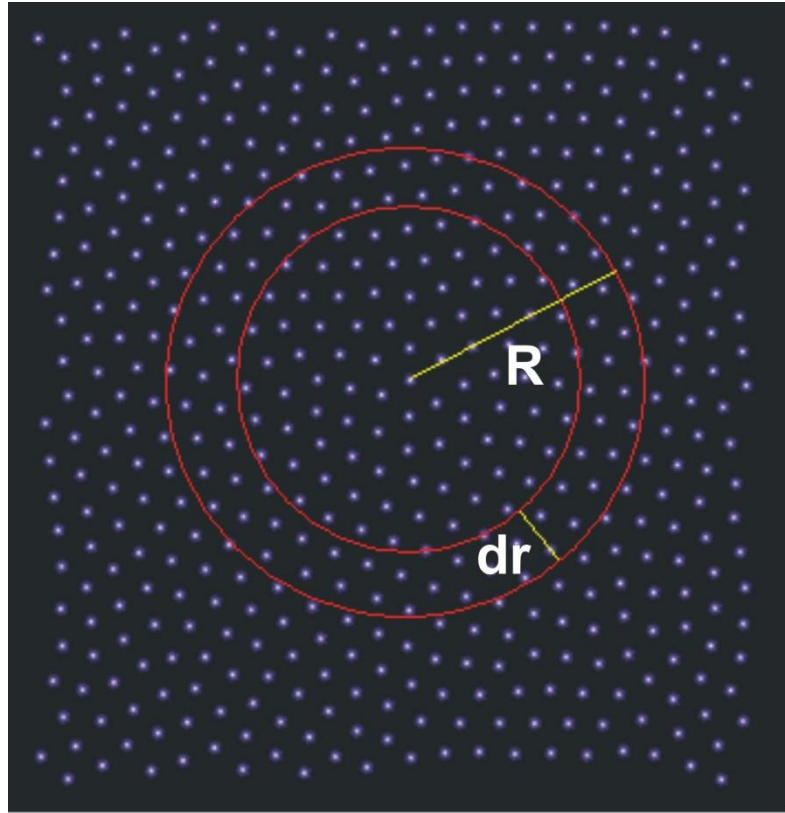


Рисунок 3.2 – К вычислению парной корреляционной функции распределения

РДФ, рассчитанные для условий разряда, соответствующих рисункам 3.1, а и 3.2, б, показаны на рисунке 3.3. Для упрощения сравнения приведена зависимость обеих функций от относительного расстояния $r^* = r/a$, где $a = (3/4\pi n_d)^{1/3}$ – среднее межчастичное расстояние.

Анализируя рисунок 3.3, можно отметить, что отношение высоты первого максимума к высоте первого минимума РДФ $g_{\max} / g_{\min} > 2.7$ для $Wp=2.5$ Вт, что соответствует кристаллическому состоянию пылевой структуры. Для $Wp=13.7$ Вт это отношение составляет $g_{\max} / g_{\min} = 1.38$, т.е. система находится в жидком состоянии. Переход из кристаллического состояния в жидкое при увеличении мощности ВЧ разряда связано с увеличением температуры буферного газа [48]. Разогрев буферного газа приводит к наблюдаемому плавлению плазменно-пылевой структуры.

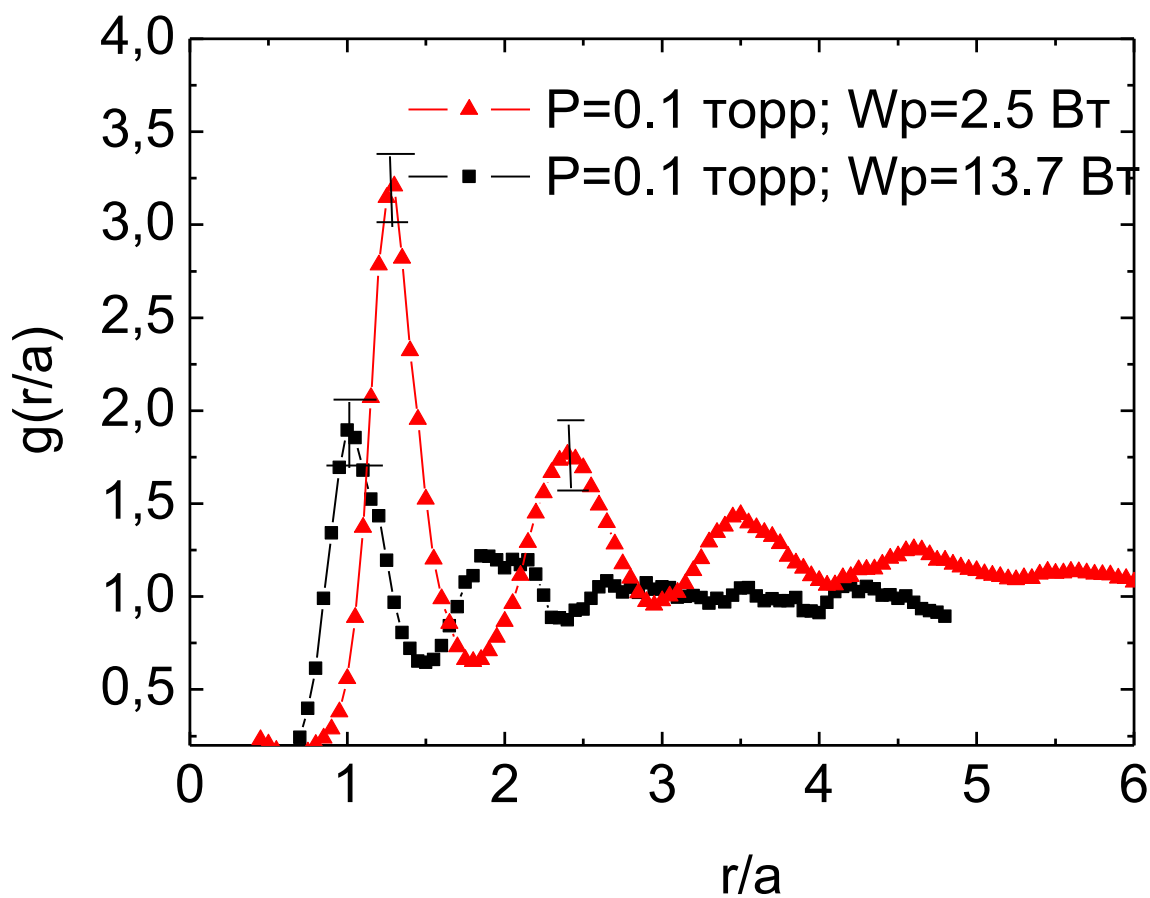
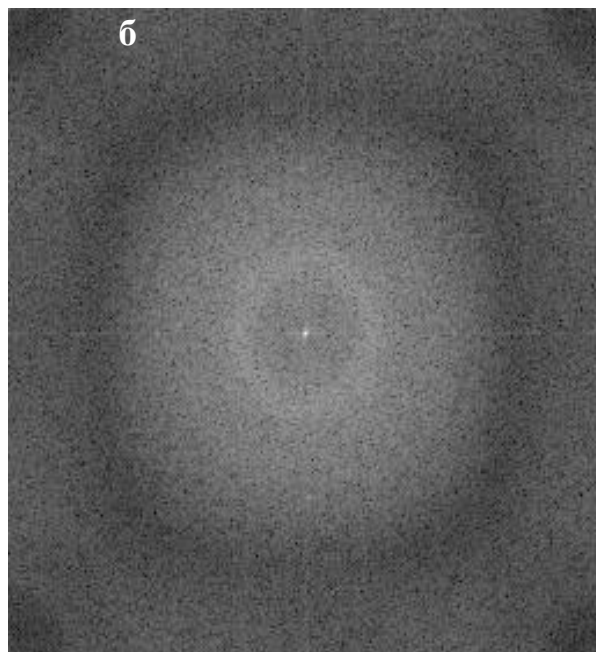
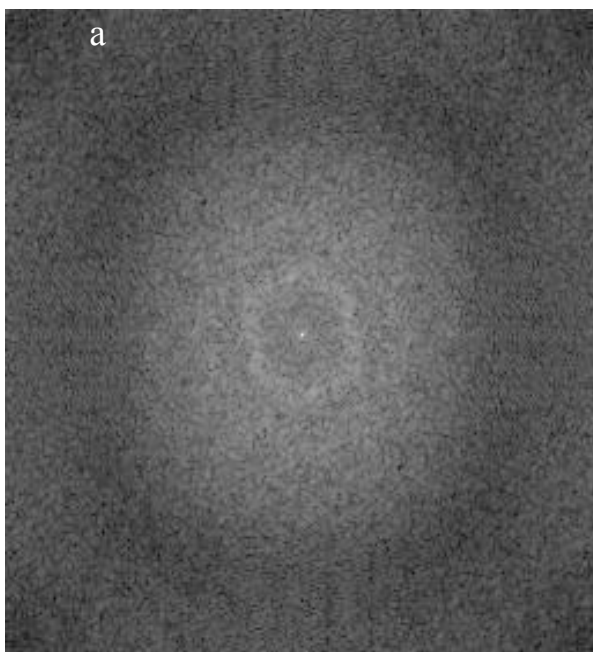


Рисунок 3.3 - Парные корреляционные функции распределения пылевых частиц в плазме высокочастотного разряда

Для исследования изменения симметрии пылевого формирования был изучен спектр пространственной плотности отдельных конфигураций системы, которые получаются на основе двумерного преобразования Фурье [49, 50]. Получаемые распределения квадрата модуля пространственной плотности соответствуют дифракционной картине Фраунгофера и приведены на рисунках 3.4а и 3.4б для вышеприведенных состояний плазменно-пылевых структур.

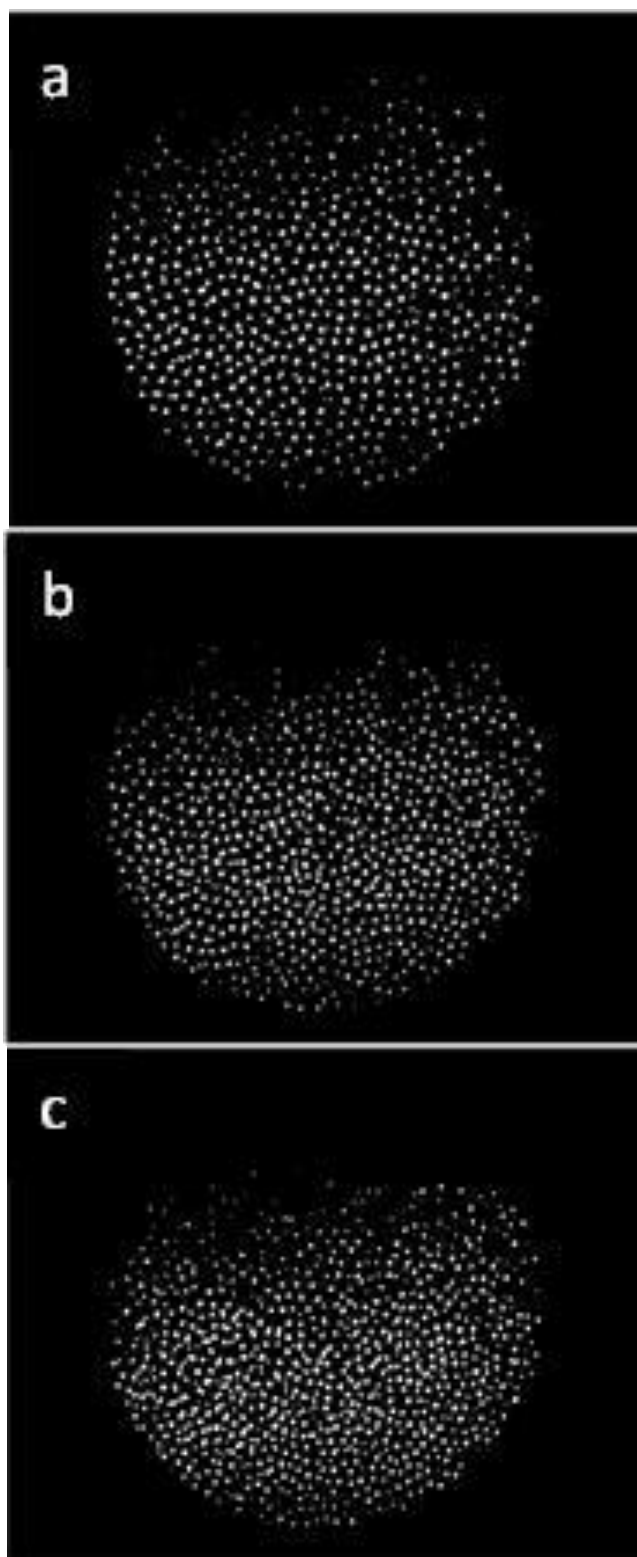


- а) давление газа $p=0.1$ торр, мощность разряда $W_p=2.5$ Вт
 б) давление газа $p=0.1$ торр, мощность разряда $W_p=13.7$ Вт

Рисунок 3.4 - Фурье преобразования плазменно-пылевых образований, полученных в плазме высокочастотного разряда

Для $W_p=2.5$ Вт симметричное распределение пространственной плотности, наблюдаемое на рис. 3.4а в виде шестигранника, свидетельствует о наличии в системе плотноупакованной поликристаллической структуры. Данный вывод подтверждается вышеприведенным анализом РДФ. Для случая $W_p=13.7$ Вт (рисунок 3.4б) который соответствует жидкому состоянию плазменно-пылевого формирования, симметрия в распределении пространственной плотности отсутствует.

Ниже на рисунке 3.5 представлены фотоизображения плазменно-пылевых образований в ВЧ разряде, полученные при другом давлении и разных значениях мощности разряда, а также соответствующие им радиальные функции распределения (рисунок 3.6).



a) $W_p = 6.25 \text{ Вт}$, b) $W_p = 11.25 \text{ Вт}$, c) $W_p = 16.25 \text{ Вт}$

Рисунок 3.5 - Фотографии плазменно-пылевых структур в ВЧ разряде аргонной плазмы при давлении буферного газа $p = 0.125 \text{ торр}$ и приложенной мощности

Сравнение радиальных функций распределения приведены на рисунке 3.6, из которого видно, что пики кривых распределения становятся менее выраженными с повышением мощности разряда. Это означает, что структура облака пыли становится более беспорядочной с увеличением подводимой мощности. Все описанные явления можно объяснить тем фактом, что температура буферной плазмы растет при увеличении приложенной мощности, и это приводит к увеличению кинетической энергии уже частиц пыли.

Как показывают результаты данной работы, наблюдение плазменно-пылевых формирований в емкостном ВЧ разряде позволяет изучить динамику фазовых переходов «кристалл-жидкость». Для иллюстрации этого были проведены исследования структурных свойств методами РДФ и двумерного преобразования Фурье, которые подтвердили наличие фазового перехода при увеличении мощности ВЧ разряда с 2.5 Вт до 14 Вт.

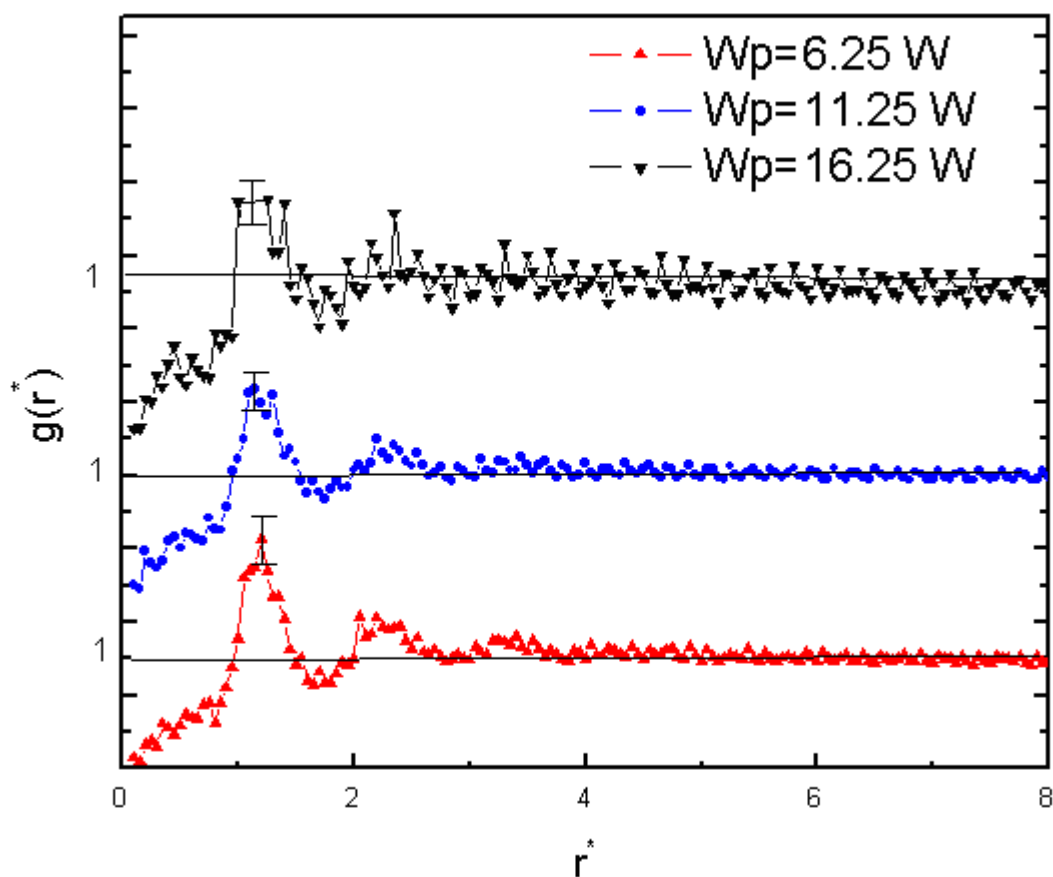


Рисунок 3.6 - Парная корреляционная функция пылевых частиц при постоянном давлении и различных значениях мощности разряда. Здесь $r^* = r/a$, где a среднее расстояние между пылевыми частицами

3.2 Коэффициент диффузии пылевой плазмы высокочастотного разряда

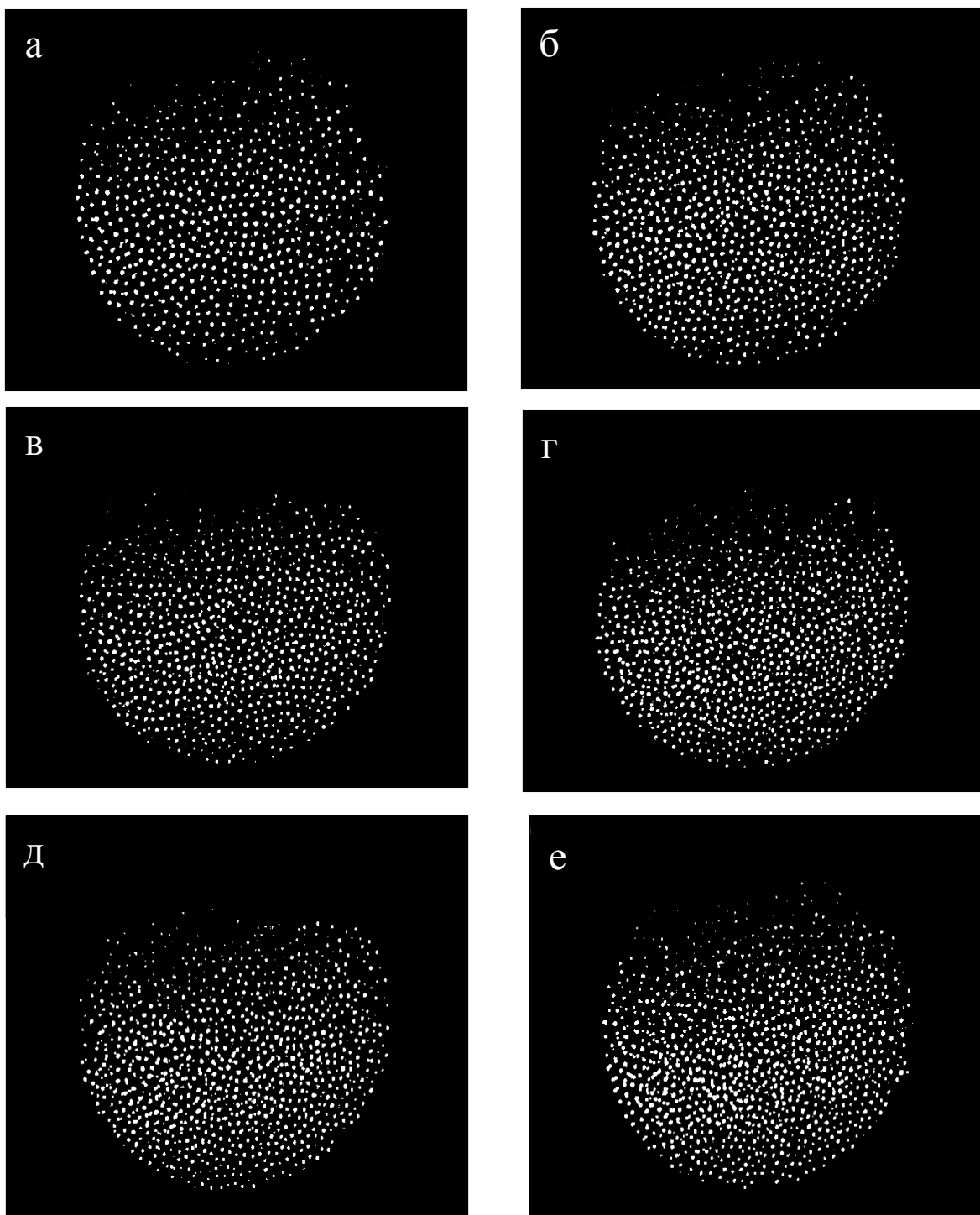
Для исследования динамических свойств пылевой плазмы были выполнены эксперименты по получению и наблюдению временной эволюции пылевых образований. Кадры из видеозаписи плазменно-пылевых структур, наблюдаемых в ВЧ разряде, представлены на рисунке 3.7. Все пылевые структуры на рисунке 3.7 были сформированы при давлении газа $p=0.125$ торр.

Как видно из рисунка 3.7, во всех случаях в горизонтальном слое плазменно-пылевой структуры наблюдается формирование плотной конденсированной системы.

Для характеристики динамических свойств пылевого формирования были рассчитаны распределения пылевых частиц по скоростям:

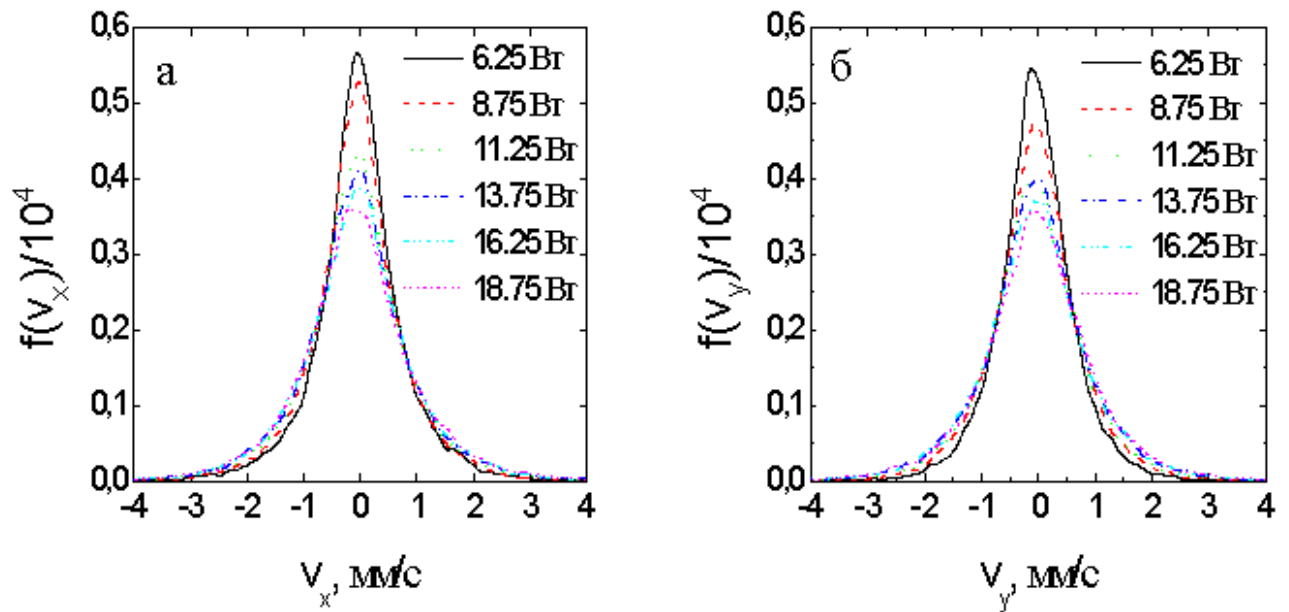
$$\begin{aligned}v_x &= \frac{\Delta x}{\Delta t}, & v_y &= \frac{\Delta y}{\Delta t}, \\v &= \sqrt{v_x^2 + v_y^2},\end{aligned}\tag{3.2}$$

где v_x и v_y – компоненты скорости по оси x и y ; Δx и Δy – смещения по осям x и y в плоскости наблюдения; Δt – промежуток времени между последовательными кадрами; v – абсолютная величина скорости.



а) мощность разряда $W_p=6.25$ Вт; б) мощность разряда $W_p=8.5$ Вт;
 в) мощность разряда $W_p=11.25$ Вт; г) мощность разряда $W_p=13.75$ Вт;
 д) мощность разряда $W_p=16.25$ Вт; е) мощность разряда $W_p=18.75$ Вт

Рисунок 3.7 - Изображения плазменно-пылевых структур, сформированных в плазме ВЧ разряда при давлении рабочего газа $p=0.125$ торр
 Распределения пылевых частиц по компонентам v_x и v_y , соответствующие экспериментам на рисунках 3.7а – 3.7е, представлены на рисунках 3.8а и 3.8б, а распределение по абсолютным скоростям – на рисунке 3.9.



- а) распределение скорости пылевых частиц по компоненте v_x
 б) распределение скорости пылевых частиц по компоненте v_y

Рисунок 3.8 - Распределения пылевых частиц по компонентам скорости в плазме высокочастотного разряда

Анализируя рисунки 3.8 и 3.9, можно отметить, что распределение скоростей пылевых частиц соответствует максвелловскому распределению [52-53]. На рисунке 3.9 видно, что с увеличением мощности разряда высота пиков кривых распределения становится меньше и сдвигается вправо, в то время как кривые распределения становятся шире. Это означает, что температура пылевых частиц становится больше и количество пылевых частиц с высокой кинетической энергией увеличивается. Увеличение кинетической энергии пыли является следствием их нагрева частицами буферной плазмы, кинетическая энергия которых возрастает с увеличением мощности разряда. Температура пылевых частиц при различных значениях мощности разряда может быть оценена по максимумам функции распределения скоростей. Наиболее вероятная скорость $v_p = \sqrt{2k_B T_d / m_d}$ используется для расчета температуры пылевых частиц. Здесь k_B является постоянной Больцмана, m_d есть масса пылевых частиц и T_d - температура пыли. Анализируя рисунок 3.10, можно отметить, что при увеличении мощности разряда температура пылевых частиц возрастает линейно. Значение температуры пылинок в плазме варьируется от сотых вплоть до нескольких эВ (Таблица 1), что хорошо согласуется с данными других авторов [52].

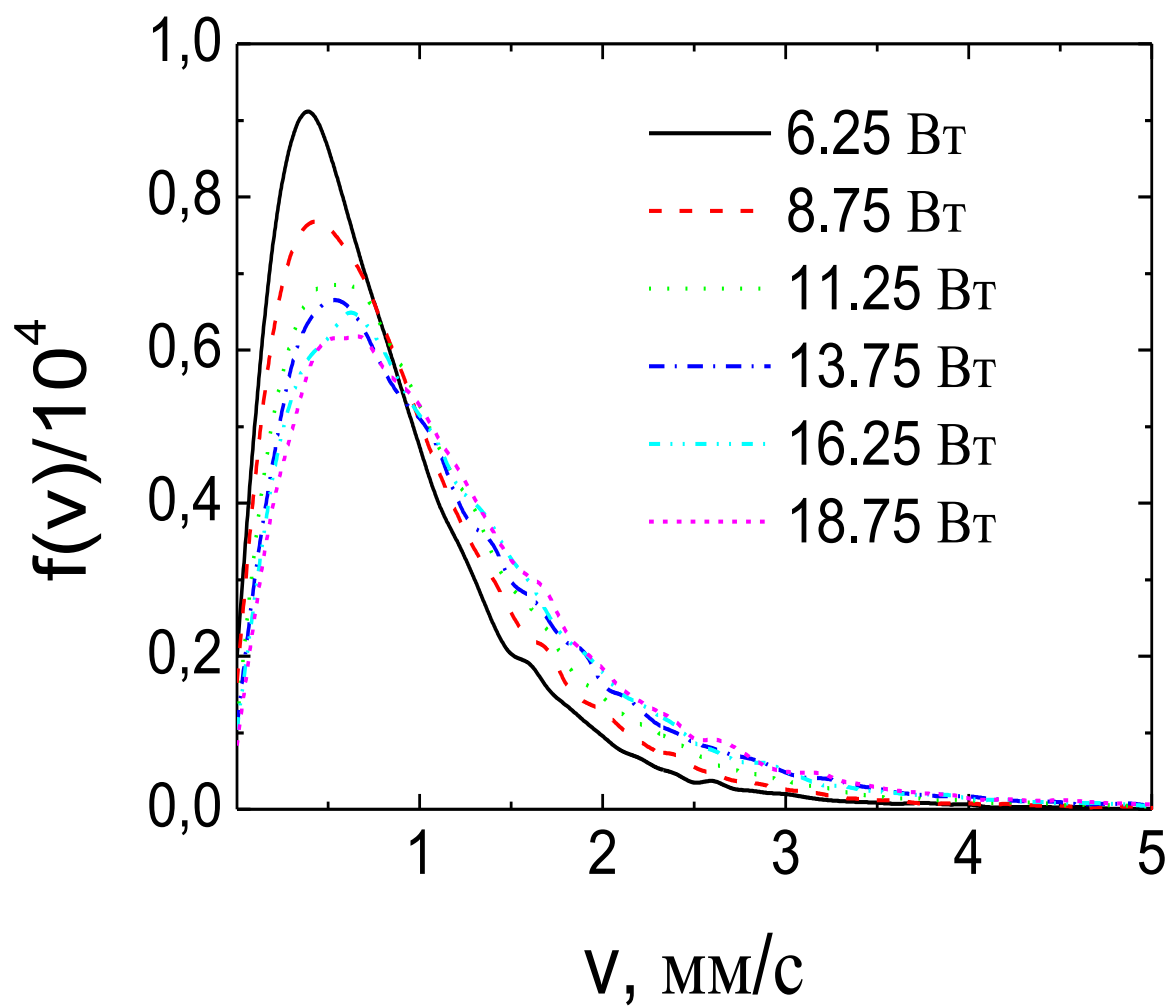


Рисунок 3.9 - Распределения пылевых частиц по абсолютным величинам скорости

Таким образом, наблюдение за эволюцией плазменно-пылевых формирований в ВЧ разряде позволяет изучить динамические свойства пылевой плазмы. Как показывают результаты, основанные на анализе функций распределения скоростей пылевых частиц, температура пылевой компоненты возрастает пропорционально мощности ВЧ разряда.

Диффузия частиц пыли является одной из важных динамических характеристик пылевой плазмы, она может дать количественную и качественную информацию о свойствах системы. Диффузия -это процесс, вызванный тепловым движением частиц пыли, он определяет рассеяние энергии в плазменно-пылевых структурах [54]. Поэтому столь важно изучать процесс диффузии частиц пыли в буферной плазме и ее зависимость от параметров окружающей плазмы, особенно температуры ([54-56]). В связи с этим, был проведен ряд экспериментов с пылевой плазмой, в которых движения пылевых частиц в горизонтальных сечениях структуры пылевого облака были записаны на видеокамеру CCD и полученные траектории частицы были обработаны с помощью специальных компьютерных программ. Видеозаписи были сделаны при постоянном значении давления газа в аргонной плазме и при трех различных значениях мощности разряда, кадры этих видеозаписей представлены на рисунке 3.5. Распределения пылевых частиц, соответствующие этим видеозаписям, представлены на рисунке 3.11. Было установлено, что полученные функции распределения соответствуют распределению Максвелла ([57,46]).

Коэффициент диффузии пылевых частиц был получен с помощью траекторий пылевых частиц по формуле для временной зависимости отношения среднеквадратичного смещения частиц к времени наблюдения:

$$D_{msd}(t) = \langle \vec{r}(0) - \vec{r}(t) \rangle^2 / 4t, \quad (3.3)$$

Здесь квадратные скобки означают усреднение по ансамблю и по различным начальным моментам. Как показано на рисунке 3.12, коэффициент диффузии пылевой компоненты представляет собой предельное значение

$D_{msd} = \lim_{t \rightarrow \infty} D_{msd}(t)$. Это значение увеличивается с увеличением мощности разряда. Коэффициент диффузии невзаимодействующих частиц определяется соотношением Эйнштейна

$$D_0 = \frac{k_B T_d}{\nu m_d}, \quad (3.4)$$

здесь ν - коэффициент трения, возникающего, когда пылинки движутся в плазме. Его можно оценить с помощью соотношения $\nu = C_n \cdot P[\text{Па}] / (a_d[\text{мкм}] \cdot \rho[\text{г} \cdot \text{см}^{-3}])$, где C_n - численный коэффициент

($C_n = 8.6$ для аргона), p является давлением буферного газа в экспериментах, $a_d = 4$ мкм является средним размером частиц пыли оксида алюминия (использованных в описанных экспериментах), $\rho = 4 \text{ г/см}^3$ - массовая плотность оксида алюминия, $m_d = 1071.7 \cdot 10^{-12} \text{ г}$ - масса пылевых частиц оксида алюминия. В таблице 3.1 представлены значения коэффициента диффузии, полученные в экспериментах и вычисленные значения D_0 для невзаимодействующих частиц.

Таблица 3.1 - Температура и коэффициент диффузии пылевых частиц при постоянном давлении и при различных значениях мощности разряда

Wp (W)	$k_B T_d$ (eV)	$D_0, \text{cm}^2 / \text{sec}$	$D_{msd}, \text{cm}^2 / \text{sec}$	D_{msd} / D_0
6.25	0.41	$0.68 \cdot 10^{-4}$	$0.48 \cdot 10^{-4}$	0.70
11.25	0.66	$1.10 \cdot 10^{-4}$	$0.66 \cdot 10^{-4}$	0.60
16.25	0.94	$1.56 \cdot 10^{-4}$	$0.77 \cdot 10^{-4}$	0.49

Таблица 3.1 показывает, что значения экспериментальных данных меньше, чем значения D_0 , полученных без учета взаимодействия между частицами пыли, что вполне понятно и объяснимо. Однако отношение D_{msd} / D_0 уменьшается с повышением температуры, в то время как можно было бы ожидать, что оно должно вырасти в связи с уменьшением роли взаимодействия. Но последнее заключение верно только в том случае, если взаимодействие будет независимым от температуры. Для правильного описания явлений в пылевой плазме необходимо учитывать все процессы, которые возникают в системе при изменении параметров пылевой плазмы. Увеличение температуры приводит к увеличению заряда пылевых частиц и взаимодействие становится сильнее. Расчеты показали, что на зависимости параметра связи $\Gamma = (Z_d(T_d)e)^2 / (ak_B T_d)$ от температуры T_d имеются некоторые максимумы. Таким образом, существует область температур, где ее рост приводит к увеличению параметра связи, что, в свою очередь, значительно снижает коэффициент диффузии по отношению к значению идеального газа. В работе [58] представлены значения коэффициента диффузии, теоретически рассчитанные на основе метода молекулярной динамики в широком диапазоне параметра связи. С помощью диаграммы из этой работы, представляющей зависимость приведенного коэффициента диффузии от параметра связи, можно оценить параметр связи, соответствующий некоторой величине отношения D_{msd} / D_0 . Для наших экспериментов было обнаружено, что $\Gamma \leq 30$.

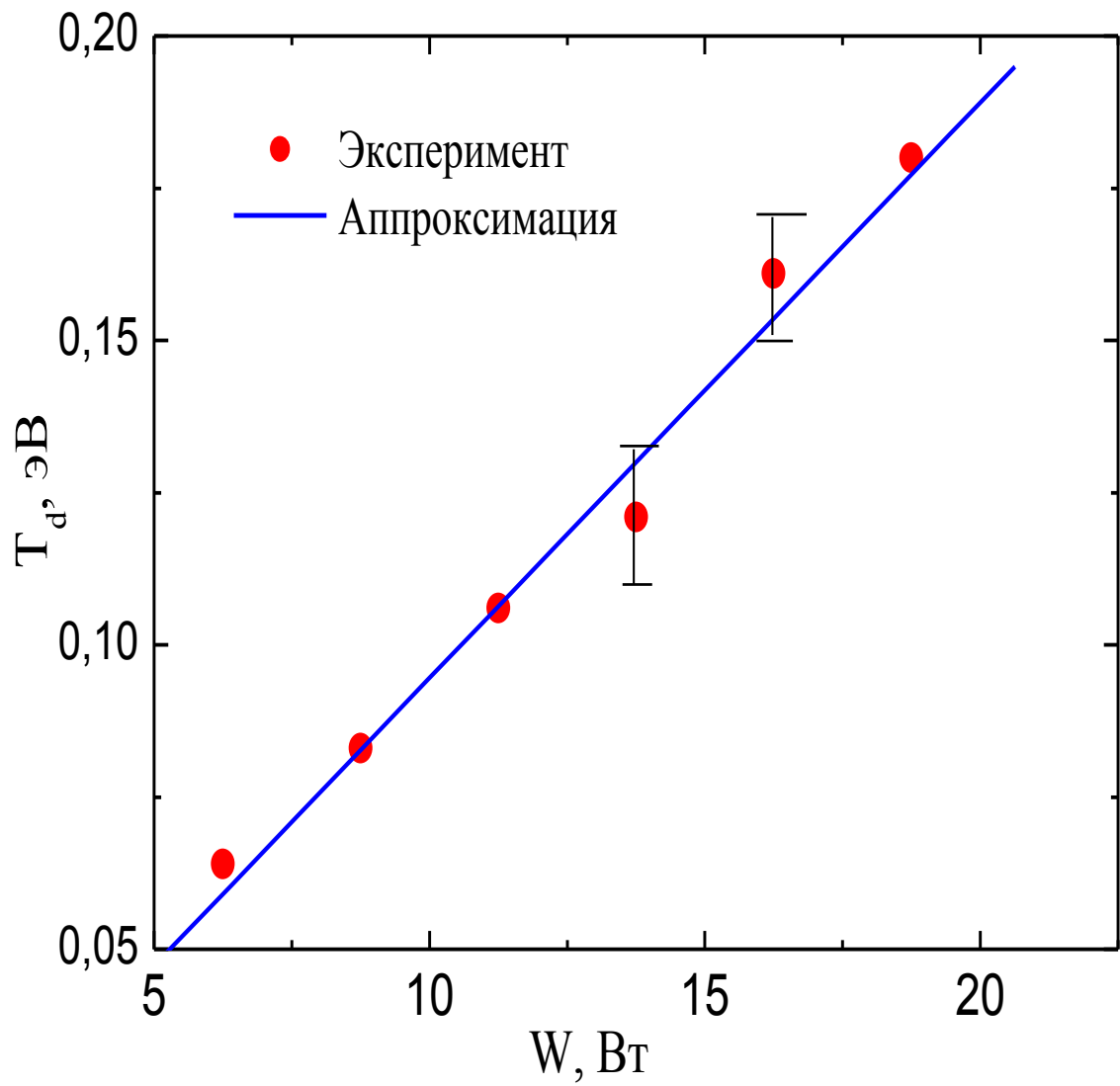


Рисунок 3.10 - Зависимость температуры пылевых частиц от мощности ВЧ разряда

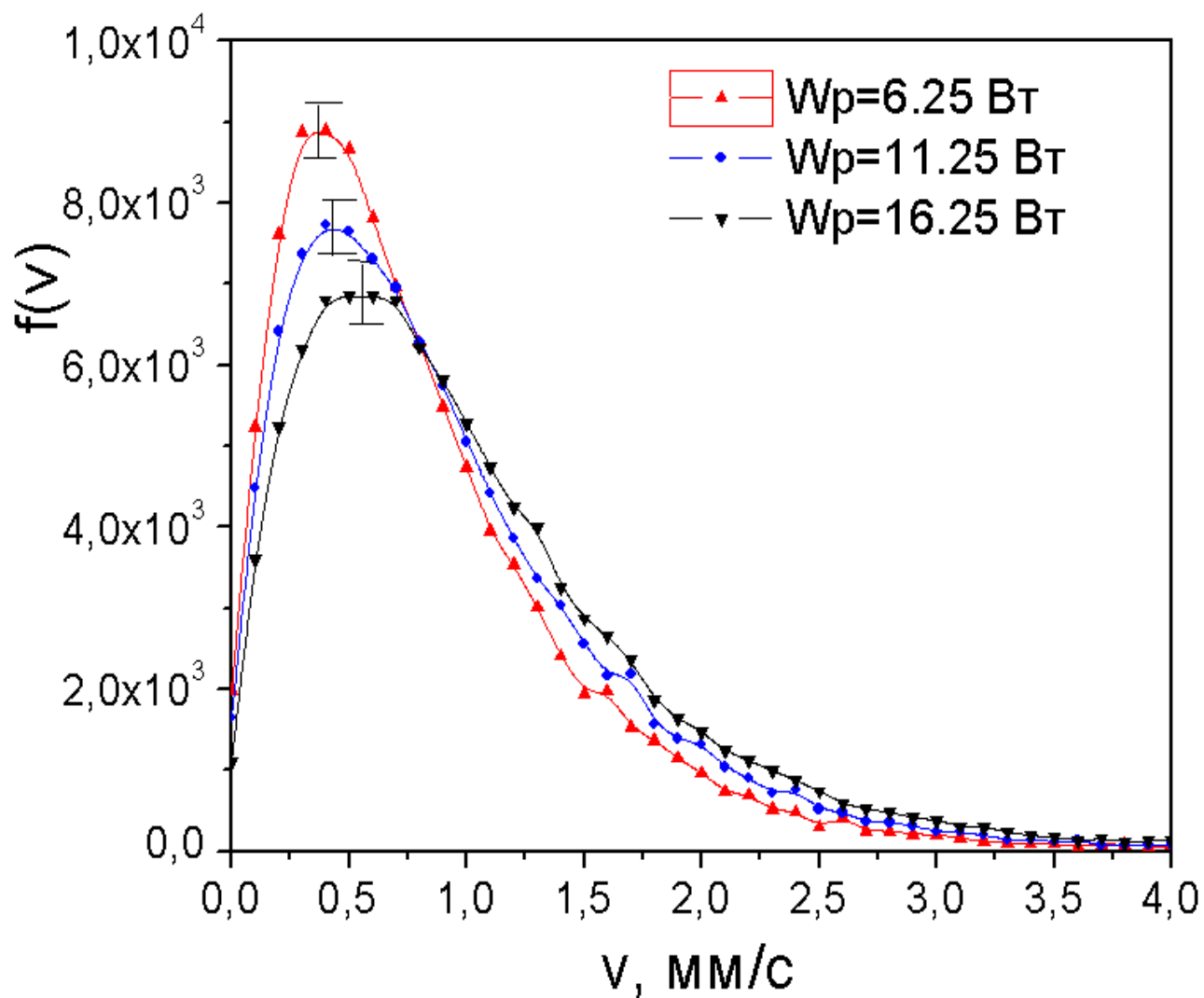


Рисунок 3.11- Функции распределения пылевых частиц по скоростям при постоянном давлении $P=0.125$ torr и различных значениях приложенной мощности

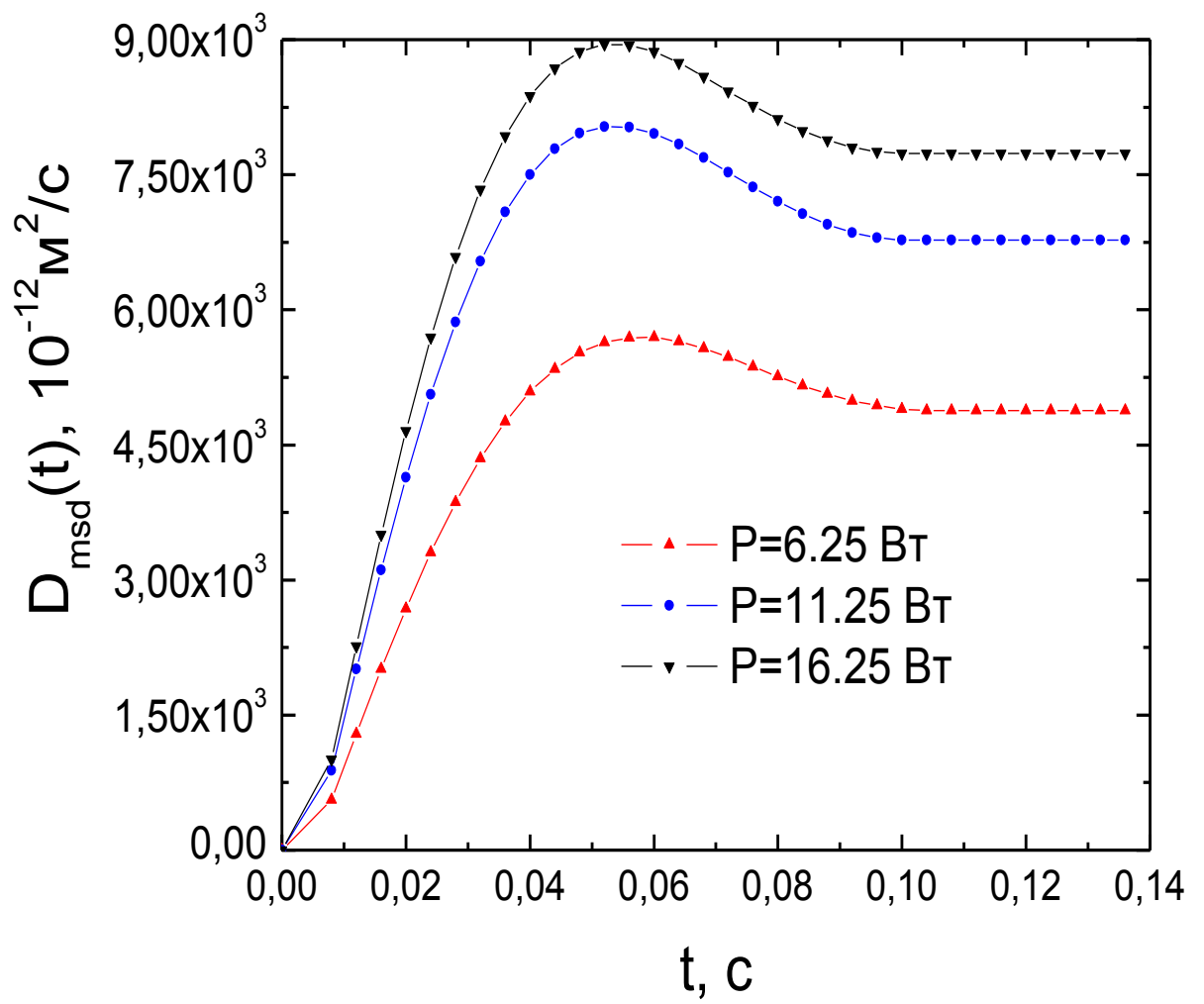


Рисунок 3.12 – Временная зависимость отношения среднеквадратичного смещения к времени наблюдения

3.3 Оптические свойства пылевой плазмы высокочастотного разряда

3.3.1 Методика определения параметров буферной плазмы по спектрам излучения

Основной целью данного пункта является исследование свойств буферной плазмы с помощью оптико-спектроскопического анализа излучения плазмы. В книге [59] приведен вывод выражений, связывающих температуру и концентрацию электронов с интенсивностями спектральных линий. Кратко изложим эти выводы для лучшего освещения данного вопроса. Выражение для интенсивности излучения спектральной линии, т. е. энергии, излучаемой единичным объемом источника в единице телесного угла при переходе атомов химического элемента из возбужденного состояния q в более низкое энергетическое состояние p , имеет вид

$$J = \frac{1}{4\pi} A_{qp} n_q h \nu_{qp} \quad (3.5)$$

где A_{qp} — вероятность перехода $q \rightarrow p$; n_q — концентрация атомов элемента в источнике света, находящихся в состоянии q ; h — постоянная Планка; ν_{qp} — частота излучения света, равная: $\nu_{qp} = (E_q - E_p) / h$ (E_q и E_p — энергии соответствующих состояний).

В состоянии локального термодинамического равновесия при большой концентрации электронов в плазме и максвелловском распределении их по скоростям, когда возбуждение происходит главным образом через соударения с электронами, концентрация n_q атомов (или ионов) данного элемента описывается формулой Больцмана:

$$n_q = n_{a(i)} \frac{g_q}{Q} \cdot e^{-\frac{E_q}{k_B T}} \quad (3.6)$$

Здесь $n_{a(i)}$ — общая концентрация нейтральных атомов (или ионов определенного заряда) данного элемента во всех возможных энергетических состояниях; g_q — статистический вес состояния q ; Q — статистическая сумма по всем состояниям; T — абсолютная температура; k_B — постоянная Больцмана.

Если энергию E_q выразить в электрон-вольтах — ε_q , то выражение (3.6) при подстановке численного значения k_B можно записать в следующей удобной форме:

$$n_q = n_{a(i)} \frac{g_q}{Q} \cdot 10^{-\frac{5040}{T} \varepsilon_q} \quad (3.7)$$

Сумма по состояниям определяется системой энергетических уровней атома (иона) и зависит от температуры плазмы:

$$Q_{a(i)} = \sum_{q=0}^j g_q e^{-\frac{E_q}{kT}}, \quad (3.8)$$

где g_q — статистический вес состояний атома (или иона) с энергией E_q .

Согласно формуле (3.6), чем меньше Q , тем больше относительная концентрация n_q . При высоких температурах значение Q для разных элементов различно. При этом, справедливо выражение $Q = Q' \cdot 10^{-\frac{5040 E'}{T}}$. Подставив полученные выражения для Q , соответственно, в формулы (3.6) и (3.7), будем иметь:

$$n_q = n_{a(i)} \frac{g_q}{Q'} e^{-\frac{E_q - E'}{kT}} \quad (3.9)$$

$$n_q = n_{a(i)} \frac{g_q}{Q'} \cdot 10^{-\frac{5040}{T}(\varepsilon_q - \xi)} \quad (3.10)$$

Величину $E'(\xi)$ рассматривают как некоторую «поправку» к энергии возбуждения $E_q(\varepsilon_q)$ и определяют через разность $E_q - E'(\varepsilon_q - \xi) = \hat{E}(\varepsilon_q)$.

Величина n_a или n_i , входящая в выражения (3.6), (3.9), характеризует концентрацию в плазме только нейтральных атомов или ионов. Для практических целей более интересна связь интенсивности аналитической линии элемента с суммарной концентрацией n всех сортов частиц определяемого элемента в плазме — атомов n_a , ионов n_i и молекул n_m . В водородной плазме атомы в большей степени ионизованы, причем ионизация тем вероятнее, чем больше температура плазмы. Но вероятность образования ионов с двумя и более зарядами, как правило, мала. Поэтому степень ионизации x атомов данного элемента на поверхности электрода можно характеризовать как

отношение $x = \frac{n_i}{n_a + n_i}$, где n_i — концентрация однозарядных ионов. В свою

очередь, концентрация нейтральных атомов определяется степенью диссоциации молекул в плазме разряда: $\beta = \frac{n_a}{n_m + n_a}$. Также экспериментальная

ситуация может быть осложнена тем, что несмотря на высокую температуру плазмы молекулы некоторых элементов, отличающиеся большой энергией диссоциации $V_d(\geq 5 \text{ эВ})$, могут быть диссоциированы не полностью.

Легко показать, что концентрация атомов n_a и ионов n_i элемента (газа) связана с общей концентрацией n его частиц следующими соотношениями:

$$n_a = \frac{(1-x)\beta}{1-x(1-\beta)} n; \quad (3.11)$$

$$n_i = \frac{x\beta}{1-x(1-\beta)} n \quad (3.12)$$

Подставив эти соотношения в формулу (3.12) и последнюю в формулу (3.5), получим общие выражения для интенсивности излучения атомной J_a и ионной J_i линий:

$$J_a = \frac{1}{4\pi} h \nu_a \frac{A_{qp}^a g_{qp}^a}{Q_a'} \cdot \frac{(1-x)\beta}{1-x(1-\beta)} n \cdot 10^{-\frac{5040}{T} \epsilon_q^a} \quad (3.13)$$

$$J_i = \frac{1}{4\pi} h \nu_i \frac{A_{qp}^i g_{qp}^i}{Q_i'} \cdot \frac{x\beta}{1-x(1-\beta)} n \cdot 10^{-\frac{5040}{T} \epsilon_q^i} \quad (3.14)$$

Степень диссоциации β связана с константой диссоционного равновесия $K_n(T)$ следующим соотношением:

$$\frac{\beta}{1-\beta} = \frac{K_n}{n_2} = \frac{1.88 \cdot 10^{20}}{n^2} \cdot \frac{Q_1 Q_2}{Q_3} \left(\frac{M_1 M_2}{M_3} \right)^{3/2} T^{3/2} \cdot 10^{-\frac{5040}{T} v_d} \quad (3.15)$$

где M_1 и Q_1 - атомный вес и сумма по состояниям определяемого элемента; M_2 и Q_2 — то же для другого элемента (концентрация которого n_2), образующего молекулу с определяемым элементом; M_3 и Q_3 — молекулярный вес и сумма по состояниям для рассматриваемой молекулы.

Степень ионизации x элемента определяется равновесием между концентрацией его нейтральных атомов n_a , ионов n_i и электронов n_e в плазме. Константа ионизационного равновесия $S_n(T) = \frac{n_i n_e}{n_a}$ зависит от температуры плазмы и от энергии ионизации E_i элемента. Эта зависимость описывается соотношением Саха

$$\frac{n_i n_e}{n_a} = S_n(T) = \frac{(2\pi m_e kT)^{3/2}}{h^3} \cdot \frac{2Q_i}{Q_a} e^{-\frac{E_i}{kT}} \quad (3.16)$$

где m_e — масса электрона.

Исходя из этого соотношения, и $\frac{n_i}{n_a} = \frac{x}{1-x}$ учитывая, что получим следующее уравнение для определения степени ионизации элемента:

$$\frac{x}{1-x} = \frac{S_n(T)}{n_e} = \frac{(2\pi m_e kT)^{3/2}}{h^3} \cdot \frac{1}{n_e} \cdot \frac{2Q_i}{Q_a} e^{-\frac{E_i}{kT}} \quad (3.17)$$

В спектральном анализе обычно регистрируется спектр интегрального излучения ВЧЕР разряда, вертикальное изображение которого проектируется в объектив спектрометра. При этом можно различать два разных случая. В первом случае в прибор попадает излучение спектральной линии от узкой вертикальной полосы столба, вырезанной по его осевому сечению, т. е. интегрированное по диаметру. Это излучение с точностью до некоторого постоянного множителя описывается интегралом вида:

$$I_{uz} = 2 \int_0^{\infty} J(r) dr \quad (3.18)$$

Во втором случае в прибор попадет излучение линии, интегрированное по всему поперечному сечению столба. Это излучение с точностью до множителя равно:

$$I_k = 2\pi \int_0^{\infty} J(r) r dr \quad (3.19)$$

Здесь $J(r)$ —интенсивность излучения данной линии в единице телесного угла и в единичном объеме, находящемся на расстоянии r от оси дуги. Эта величина описывается выражениями (3.13) или (3.14),

Эффективные значения $T_{эф}$, n_e и $R_{эф}$ - это параметры такого гипотетического радиально однородного цилиндрического дугового источника, который дает такую же интегральную интенсивность I_{uz} и I_k линии, как и данный реальный радиально неоднородный источник. Заменяя $T(r)$ и $n_e(r)$ соответствующими, не зависящими от r , постоянными для данного источника значениями $T_{эф}$ и $n_{эф}$, можем вынести J в выражениях (3.18) и (3.19) за знак интеграла и получим следующие уравнения для I_{uz} и I_k :

$$I_{uz} = 2R_{эф} J \quad (3.20)$$

$$I_k = 2\pi R_{эф}^2 J \quad (3.21)$$

Здесь J по-прежнему описывается выражениями (3.13), (3.14) со значениями $T = T_{эф}$, $n_e = n_{эф}$.

Таким образом, исходя из этих формул температура и концентрация плазмы может быть вычислена из относительных интенсивностей J_1, J_2 двух

атомных (или двух ионных) линий с длинами волны λ_1 и λ_2 с известными энергиями возбуждения ε_1 и ε_2 , статистическими весами возбужденных состояний и вероятностями излучательных переходов $(gA)_1$ и $(gA)_2$ по следующей формуле

$$T = \frac{5040(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)}{\lg \frac{(gA)_1}{(gA)_2} - \lg \frac{\lambda_1}{\lambda_2} - \lg \frac{J_1}{J_2}} \quad (3.22)$$

Из полученной температуры можно определить концентрацию электронов. Для этого используется следующая формула

$$\lg n_e = -\lg \frac{I_i}{I_a} + \lg \frac{(gA\nu)_i}{(gA\nu)_a} - \frac{5040}{T}(V_i + \varepsilon_i - \varepsilon_a) + \frac{3}{2} \lg T + 15,684 \quad (3.23)$$

Таким образом, выражения (3.22) и (3.23) являются теоретической основой оптико-спектроскопического измерения параметров комплексной плазмы и будут использованы в рамках настоящего исследования.

3.3.2 Результаты оптико-спектроскопической диагностики пылевой плазмы

Результаты оптико-спектроскопического исследования буферной плазмы аргона при давлении буферного газа 0.11 торр и мощности разряда 35Вт представлены на рисунке 3.13. Спектр буферного газа содержит ярко выраженные спектральные линии аргона (атомарного и однократно ионизованного).

Зависимость интенсивности спектральных линий от параметров разряда также проиллюстрирована на основе результатов измерений, представленных на рисунках 3.14 и 3.15, где показаны оптические спектры плазмы при фиксированных давлениях буферного газа, но разных мощностях ВЧ разряда. В целом, увеличение мощности разряда приводит к увеличению интенсивности спектральных линий аргона.

Общим для приведенных спектров является доминирование линий возбужденного аргона в диапазоне 700 – 900 нм, что обуславливает красноватый оттенок в объеме плазмы. Используя полученные спектры была определена температура и концентрация электронов при разных давлениях газа и мощности разряда [60-63].

Справочные данные по линиям аргона, использованные для определения параметров комплексной плазмы, представлены в Таблице 3.2. Отбор линий аргона для расчета параметров производился на основе визуального определения линий, чувствительных к изменению требуемого параметра (в нашем случае, давление буферного газа).

Таблица 3.2 – Справочные данные по линиям аргона, использованные для определения параметров плазмы

Атом	E, эВ	λ , нм	g_B	A, 10^{-8} с^{-1}
Ar I	13.33	696.5	3	6.8
Ar I	15.33	549.5	9	1.7
Ar II	19.22	480.6	6	100

На основе анализа выбранных линий были проведены расчеты температуры и концентрации электронов плазмы аргона, результаты которых представлены в Таблице 3.3.

Таблица 3.3 - Температура и концентрация электронов плазмы аргона как функция от давления

Давление (p), торр	T_e , эВ	n_e , 10^{15} м^{-3}
0.08	1.02	1.15
0.12	1.05	1.26
0.15	1.18	1.56
0.20	1.24	2.18
0.25	1.27	2.42
0.50	1.80	2.33
0.70	1.60	2.11
0.90	1.30	2.05
1.50	1.01	2.03
2.02	0.90	1.98

Видно, что при изменении давления в диапазоне (0.2 – 2.0) торр температура электронов плазмы варьируется в пределах от 0.8 эВ до 1.5 эВ, а концентрация электронов изменяется в пределах от $(1.5 \cdot 10^9 - 2.7 \cdot 10^9) \text{ см}^{-3}$

В то же время полученные данные свидетельствуют о немонотонном изменении характеристик плазмы в изученном диапазоне (см. рисунок 3.16). Так, температура электронов возрастает при росте давления в диапазоне (0.2 – 0.6) торр, и монотонно спадает в диапазоне (0.7 – 2.0) торр.

Данное поведение можно объяснить на основе возрастающей роли нейтральной компоненты буферного газа при увеличении давления, так как изменение концентрации заряженной компоненты является незначительным. При низких давлениях буферного газа, «перекачка» энергии от переменного электрического поля к электронам является эффективной ввиду достаточно редких столкновений с нейтрами. При высоких давлениях газа, столкновения

с ними становятся достаточно частыми, что приводит к охлаждению электронов (буферный газ и ионная компонента имеют комнатную температуру).

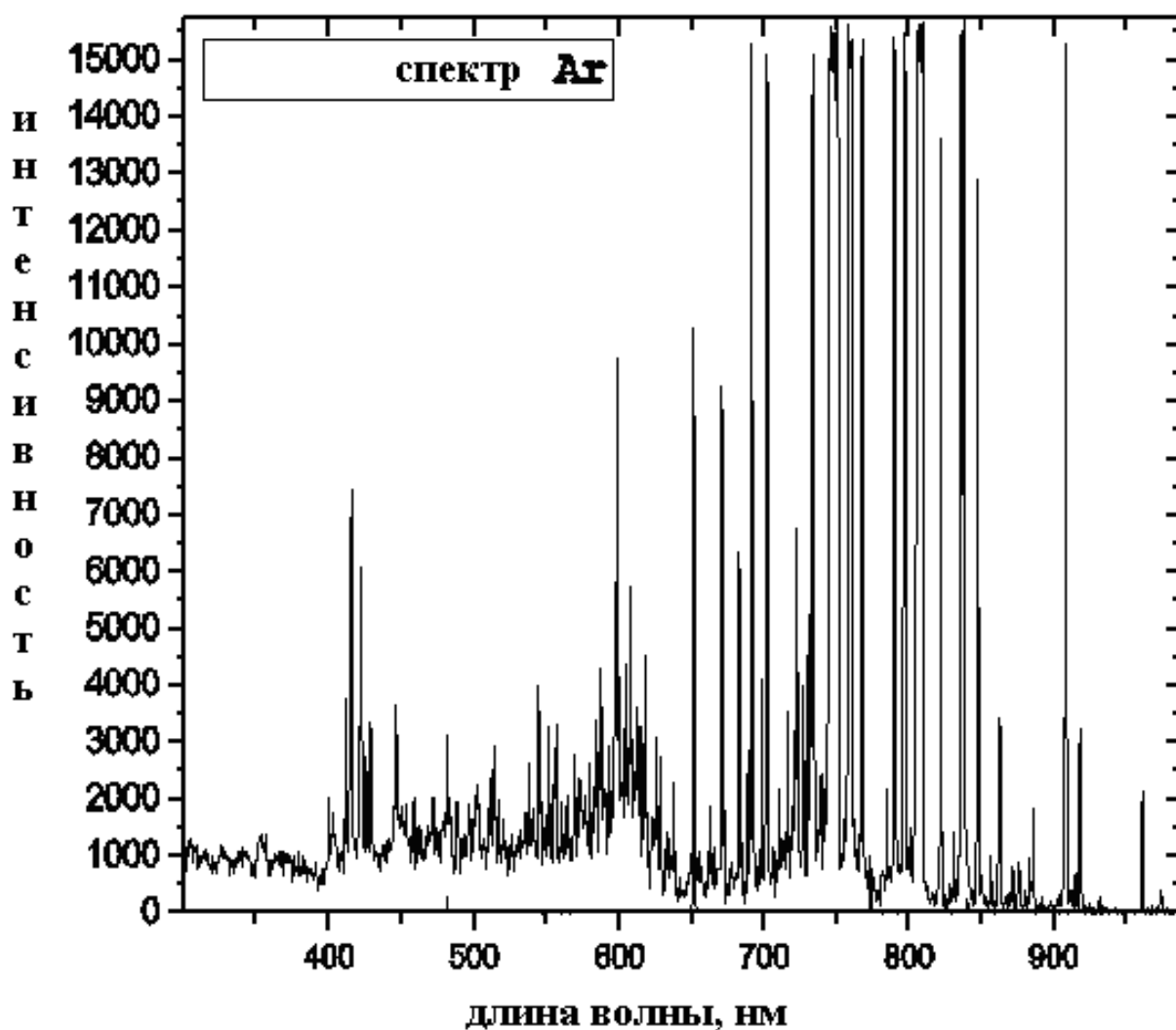


Рисунок 3.13 - Спектр плазмы аргона при давлении буферного газа $p=0.11$ торр и мощности разряда 35 Вт

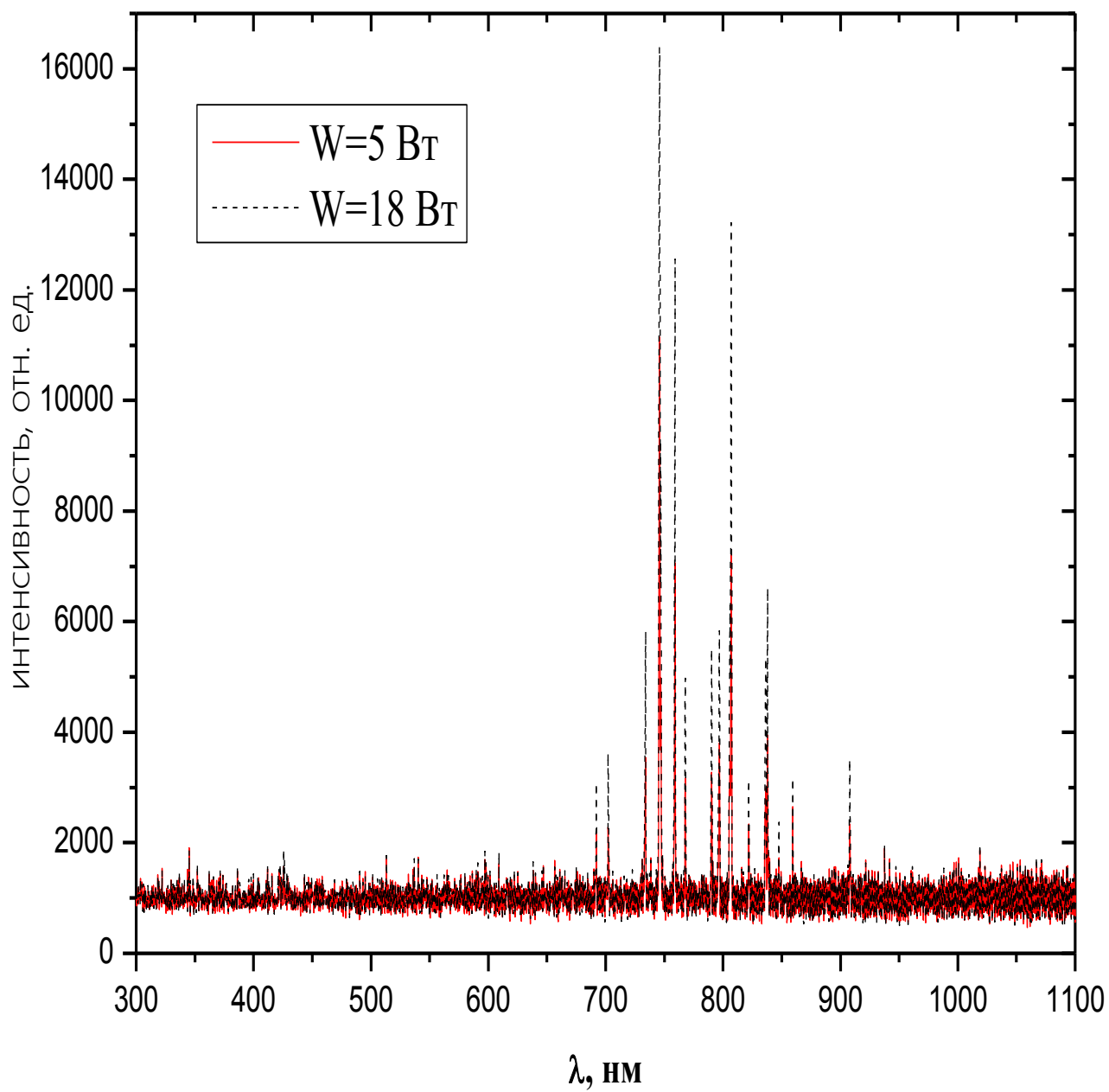


Рисунок 3.14 - Спектр плазмы аргона при различных мощностях разряда, давление буферного газа $p=0.15$ торр

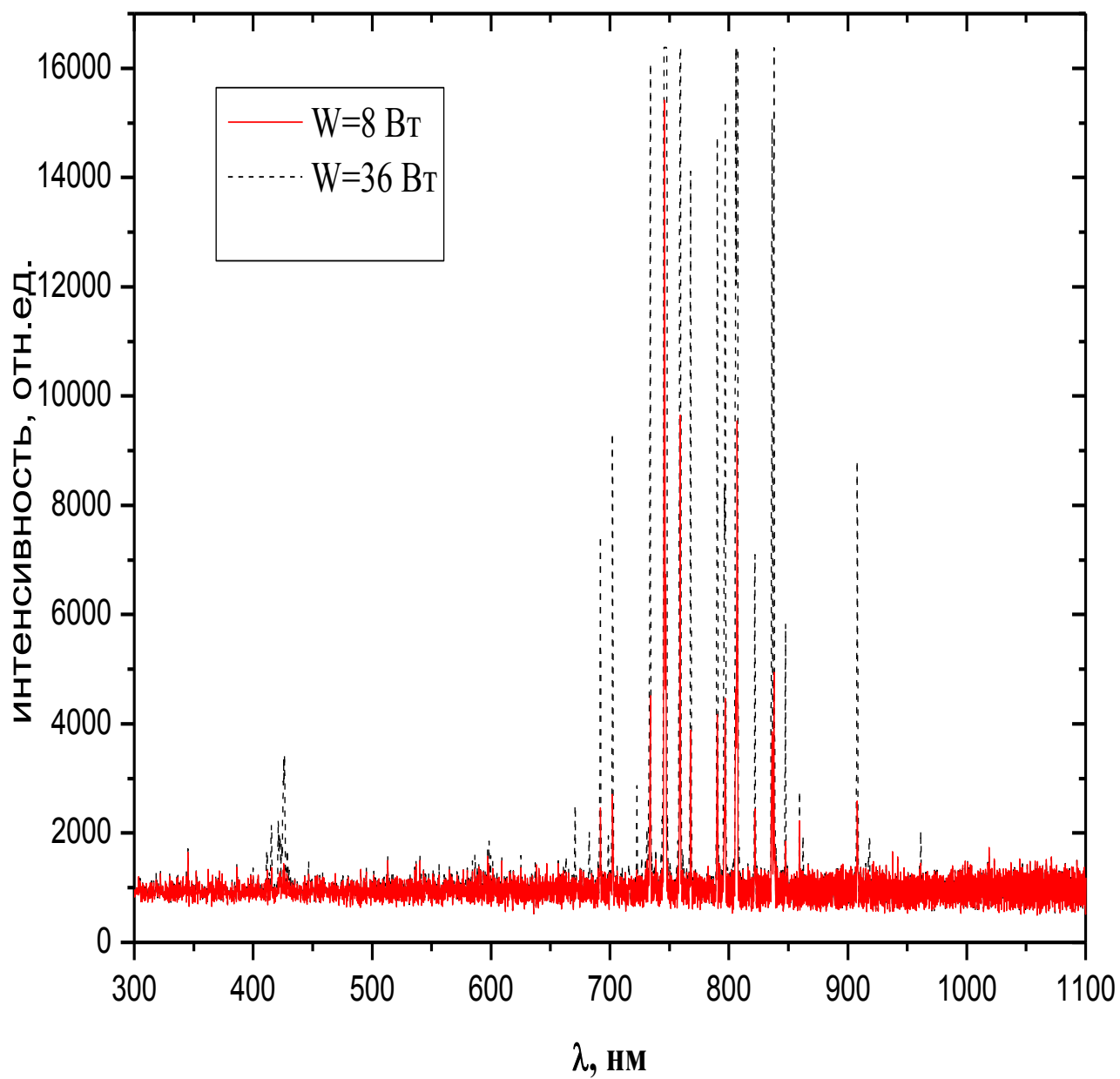


Рисунок 3.15- Спектр плазмы аргона при различных мощностях разряда, давление буферного газа $p=0.08$ торр

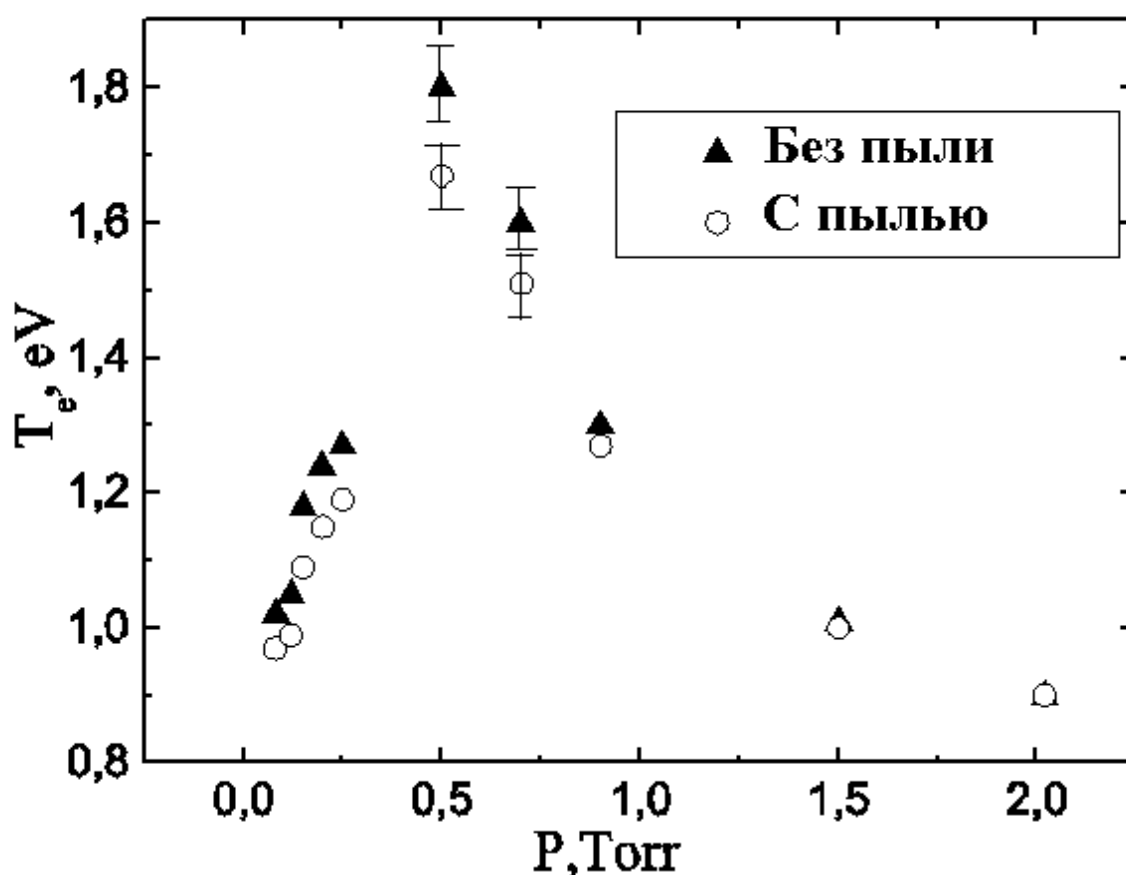


Рисунок 3.16 - Зависимость температуры от давления плазмы

3.3.2 Влияние присутствия пыли на излучение буферной плазмы

Оптические методы исследования часто используются в диагностике плазмы. Они дают богатую информацию о характеристиках свечения плазмы, которая может быть использована для получения, например, параметров буферной плазмы, таких как концентрации и температуры частиц плазмы. Тем не менее, из-за технических сложностей лишь в немногих исследовательских центрах проводятся подобные исследования. В работах [64-69] выполнялись исследования свечения плазмы, содержащей левитирующие в ней пылевые частицы. Хорошо известно, что введение частиц пыли кардинально меняет процесс ионизации в плазме, что усложняет применение классических методов спектроскопии для диагностики системы [70, 71]. В связи с этим, очень важно знать о характере влияния пылевых частиц на спектральные свойства плазмы и оценить степень изменений, которые пылевая компонента приносит в буферную плазму. В этой работе сделана попытка исследования влияния пылевой компоненты на спектр буферной плазмы. Была исследована интенсивность спектральных линий аргоновой плазмы до и после введения пылевых частиц. Распределение интенсивности спектральных линий аргона, полученные в результате эксперимента, приведены на рисунках 3.17 - 3.18.

Изучение данных, полученных в результате экспериментов, позволяют с уверенностью утверждать, что при добавлении пылевых частиц микронных размеров наблюдается достоверное уменьшение интенсивности излучения спектральных линий аргона. Это в свою очередь, свидетельствует о существенном влиянии пылевых частиц на свойства плазмы ВЧ-разряда. Одним из возможных механизмов влияния является поглощение быстрых электронов на пылевой частице, вследствие которого температура электронов уменьшается. Также поглощение электронов пылевой частицей приводит к уменьшению их концентрации в объеме плазмы (при сохранении общей электронейтральности) и, как следствие, уменьшению интенсивности спектральных линий.

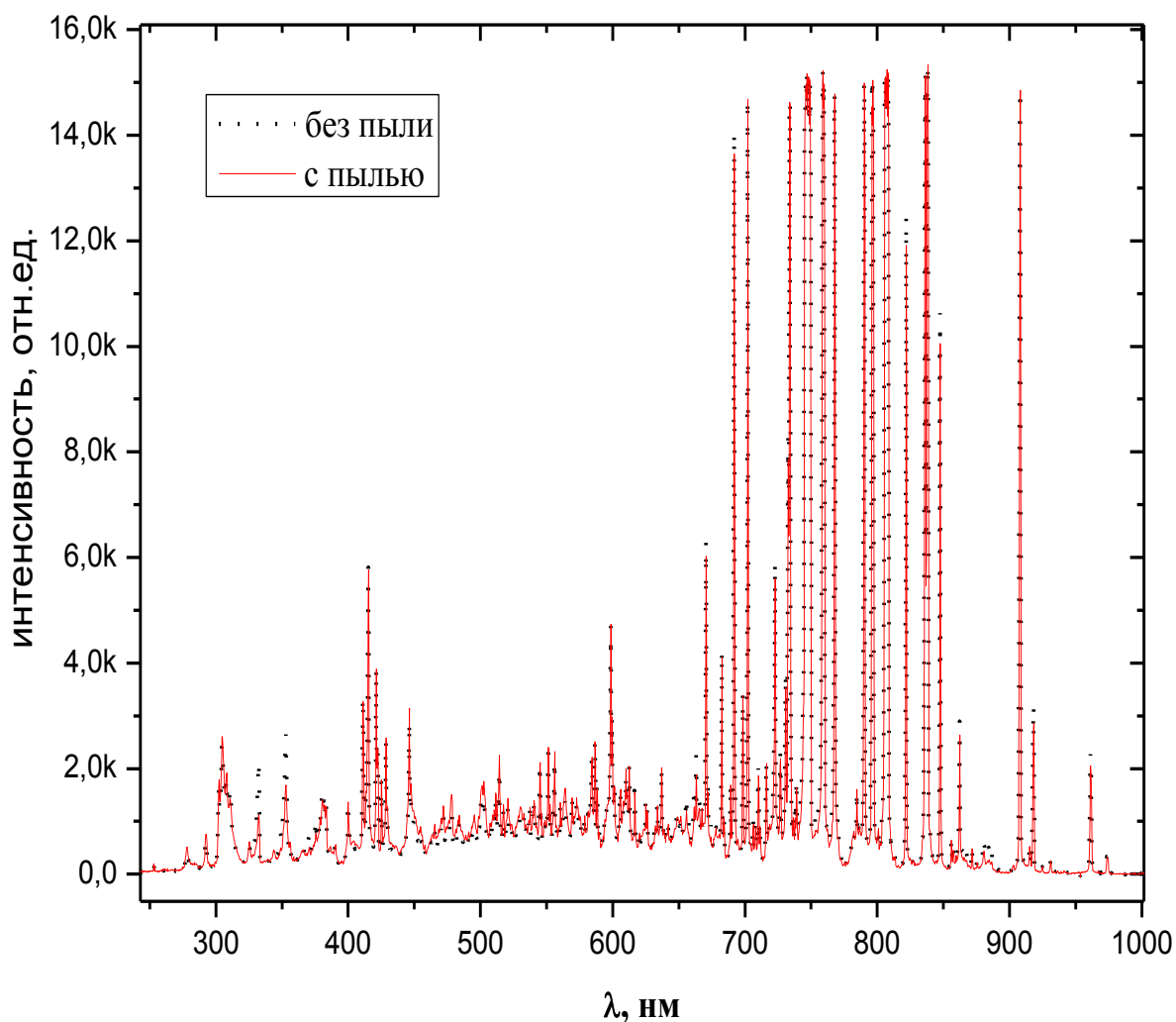
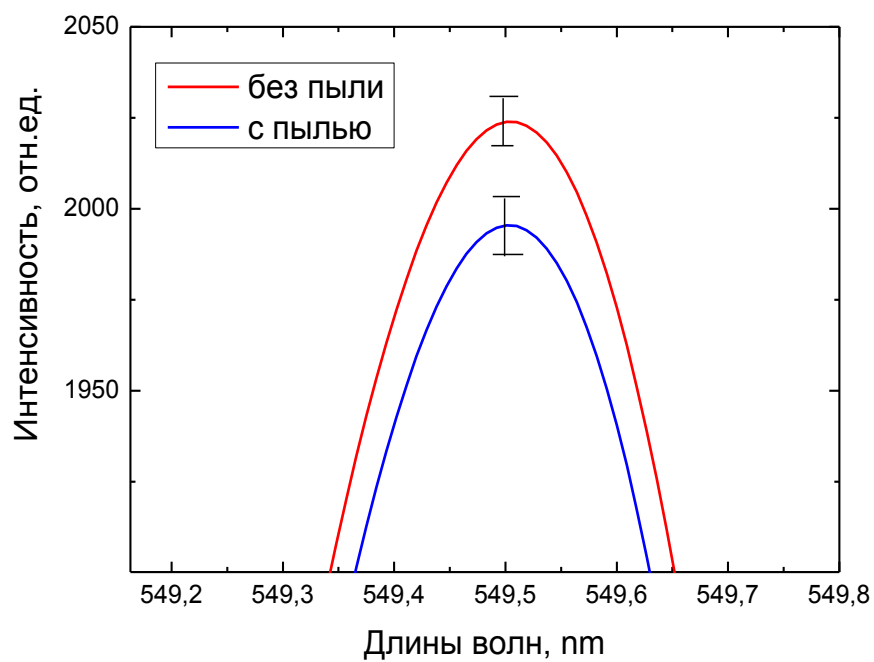
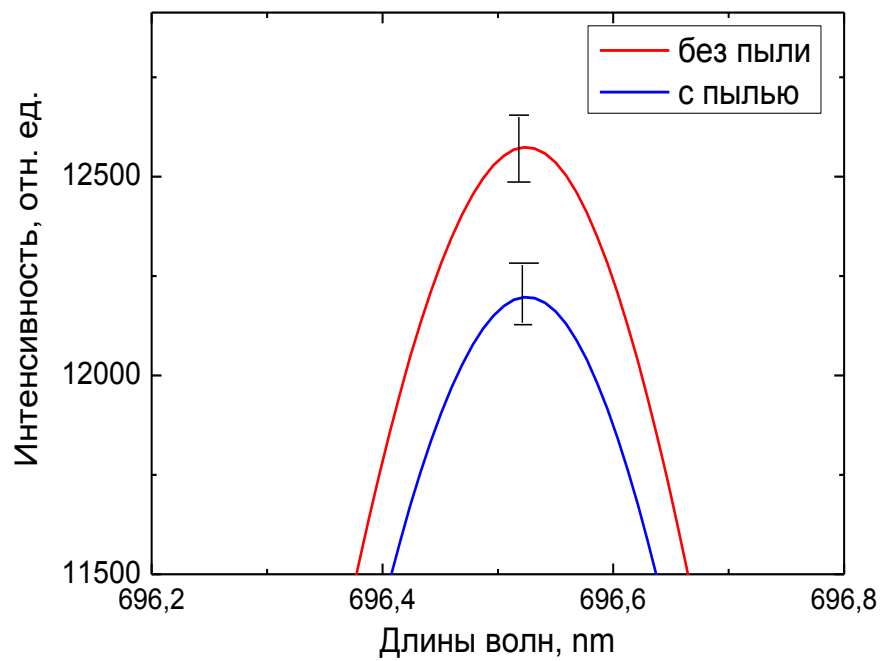


Рисунок 3.17 - Спектр аргона с пылевыми частицами и без частиц.
P=0.85 торр, W=7.5 Вт



а)



б)

а) длина волны 549.5 нм, б) длина волны 696.5 нм

Рисунок 3.18 - Интенсивности используемого спектра аргона с пылевыми частицами и без

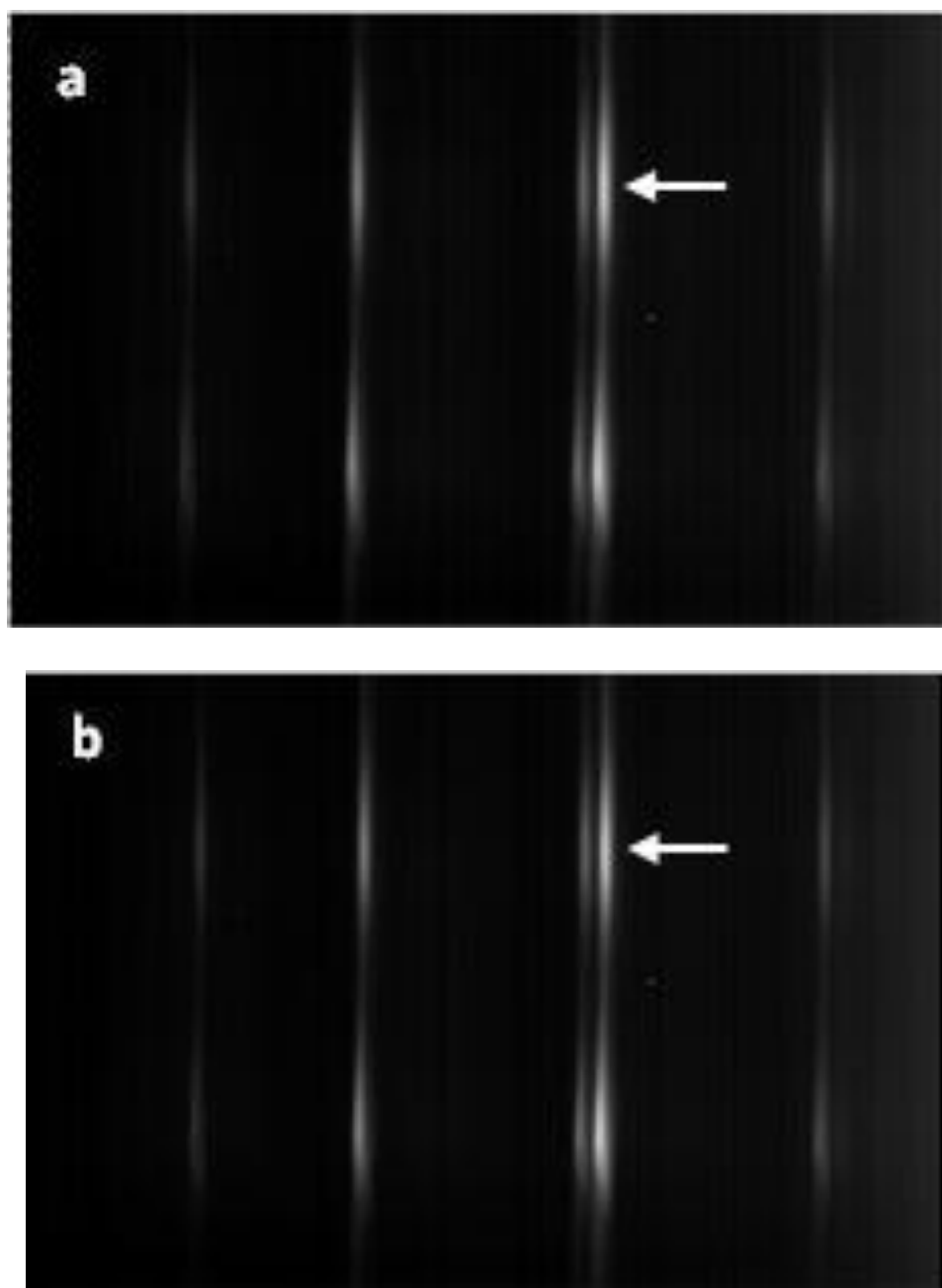


Рисунок 3.19 - Свечение плазмы ВЧ разряда без пылевых частиц (а) и с частицами пыли (b) при давлении $p = 0.125 \text{ торр}$ и мощности $W_p = 6.25 \text{ Вт}$

Также была выполнена видеозапись свечения плазмы с использованием спектрометра, способного дать двумерный спектр свечения плазмы (см. рисунок 3.19). Изображения, представленные на рисунке 3.19, соответствуют пространственным спектральным картинам свечения плазмы, представляющим собой распределение интенсивности спектральных линий аргоновой плазмы в диапазоне 688-788nm. Верхняя и нижняя границы изображения указывают расположение верхнего и нижнего электродов (расстояние между двумя плоскопараллельными электродами равно 3cm). Чем толще линии на рисунках, тем выше интенсивность свечения плазмы вблизи верхнего и нижнего электродов.

Для того, чтобы исследовать влияние пылевых частиц на спектры буферной плазмы были сравнены между собой интенсивности спектральной линии, соответствующей длине волны 750.38nm (линии дублета указаны белыми стрелками) до и после введения частиц пыли (рис. 3.19). Соответствующий атомный переход для спектральной линии 750.38nm происходит между $3s^2 3p^5(^2P^{\circ}_{1/2})4s$ и $3s^2 3p^5(^2P^{\circ}_{1/2})4p$ состояниями, коэффициент Эйнштейна для данного спонтанного излучения равен $A_{ki} = 4.45 \cdot 10^7 \text{ c}^{-1}$.

Характерная зависимость пространственного распределения интенсивности света в области 750.38 нм, полученная при давлении рабочего газа $p=0.340$ Тор и мощности разряда $P=2.75$ Вт, показана на рисунке 3.20. Промежуток между точками *A* и *B* на рис. 3.20 вблизи нижнего электрода является областью левитации пылевых частиц. Точка *C* соответствует максимуму свечения верхнего электрода.

Из рисунка 3.20 видно, что существуют два четких максимума интенсивности свечения аргона, которые соответствуют приэлектродным областям. Длина оси абсцисс соответствует расстоянию между катодом и анодом. Левая часть графика соответствует верхнему электроду в то время как правая сторона нижнему электроду. Был получен профиль интенсивности спектральной линии 750.38nm путем усреднения распределения интенсивности этой линии по 1000 кадров видеосъемки спектров излучения. Отметим, что наблюдаемая асимметрия распределения интенсивности по сечению разрядного промежутка объясняется тем, что ширина приэлектродной зоны вблизи заземленного электрода несколько больше, чем вблизи электрода, соединенного с ВЧ генератором [72-75].

Присутствие пылевых частиц в плазме не оказывает существенного влияния на спектральную характеристику плазмы в области их левитации (промежуток между *A* и *B* на рис.3.20). В то же время в распределениях интенсивности свечения, относящихся к зоне верхнего электрода, для случаев чистой плазмы и плазмы с пылевыми частицами заметны расхождения (область *C* на рис. 3.20). Одно из возможных объяснений этого эффекта заключается в том, что процесс ионизации и возбуждения атомов рабочего газа (аргон) пропорционален локальной концентрации электронов. При внесении пылевых частиц в плазму, поток электронов от нижнего электрода к верхнему электроду уменьшается за счет поглощения электронов пылевыми частицами, что приводит к уменьшению концентрации электронов в области верхнего электрода. На рисунках 3.20 и 3.21 показаны аналогичные результаты, полученные при других мощностях разряда.

Обнаруженный эффект подтверждает наличие влияния пылевых частиц на интенсивность спектральных линий аргона в ВЧЕР. Одно из его возможных применений состоит в разработке методики бесконтактной диагностики пылевых частиц, что представляет значительный интерес с технологической точки зрения.

В некоторых экспериментах, выполненных другими исследователями [76-77], было показано, что напротив, введение пылевых частиц в плазму

увеличивает интенсивность свечения. Однако в этих экспериментах были взяты частицы с размерами порядка нескольких нанометров, тогда как в описанных выше экспериментах использовались частицы микронных размеров.

В работе [76] было показано, что в пылевой плазме в условиях микрогравитации с увеличением концентрации пыли плотность электронов вначале уменьшается, но затем начинает расти, а температура электронов всегда увеличивается. А в теоретической работе [78] авторы провели расчеты на основе кинетической модели и обнаружили, что с увеличением концентрации пылинок температура электронов понижается. Это показывает, что на данном этапе этот вопрос остается открытым и должны быть выполнены серьезные исследования на эту тему, прежде чем исследователи придут к общему мнению. Таким образом, было исследовано влияние параметров разряда, таких как мощность разряда на температуру, диффузию и структуру пылевой составляющей. Показано, что увеличение подводимой мощности приводит к повышению температуры и диффузии частиц пыли и уменьшению порядка в пылевых структурах. Это было объяснено тем, что температура буферной плазмы возрастает с увеличением подводимой мощности, что приводит к увеличению кинетической энергии частиц пыли. Было исследовано влияние пылевых частиц на спектральные свойства фоновой плазмы. Изменения в интенсивности свечения плазмы при наличии частиц пыли наблюдались регулярно, но характер влияния зависит как от концентрации пыли, так и от размеров пылинок.

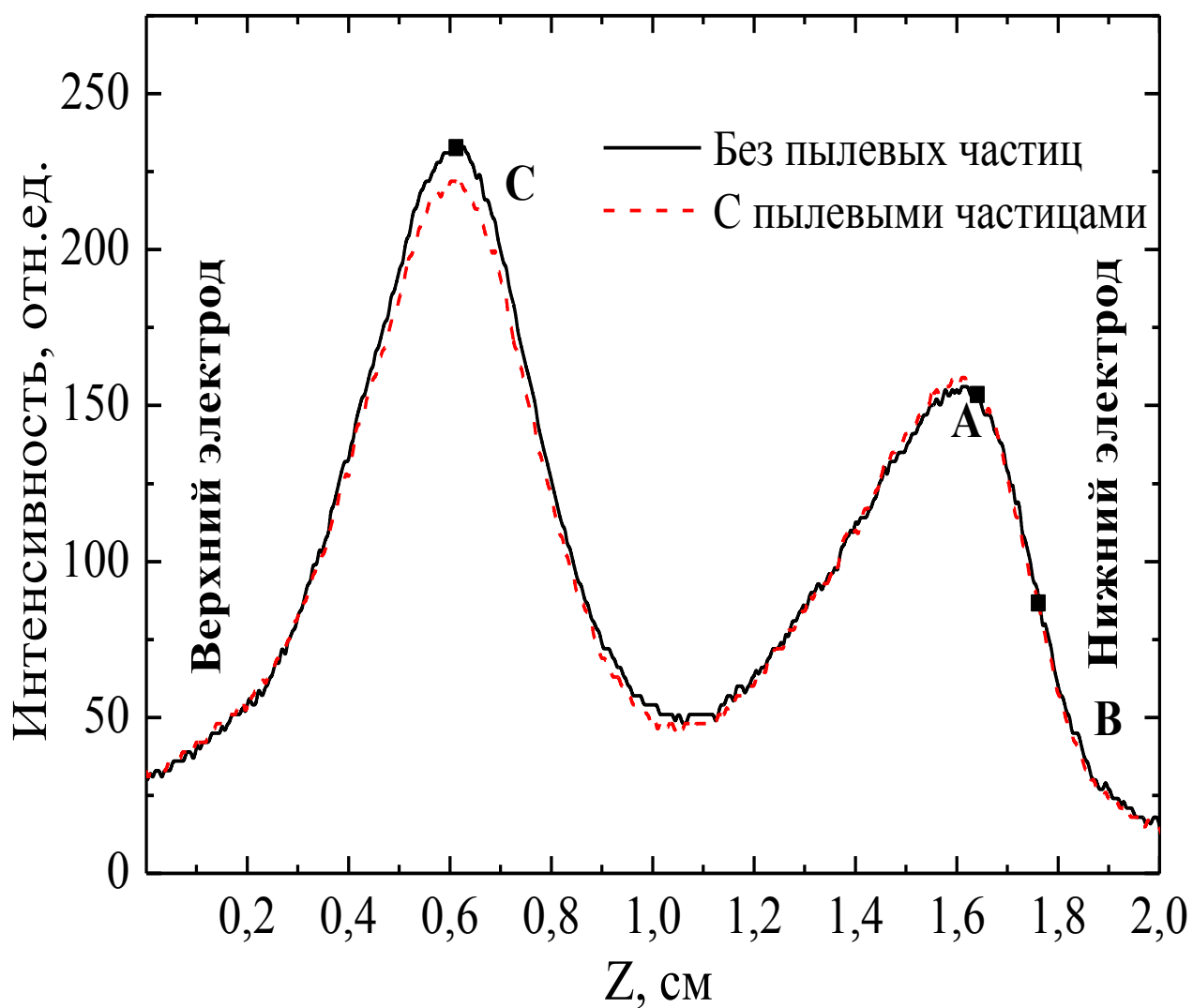


Рисунок 3.20 - Распределения интенсивности линии аргона $\lambda=750.4$ нм при давлении рабочего газа $p=0.340$ торр и мощности разряда $W_p=2.75$ Вт, полученные без пылевых частиц и с добавлением пылевых частиц

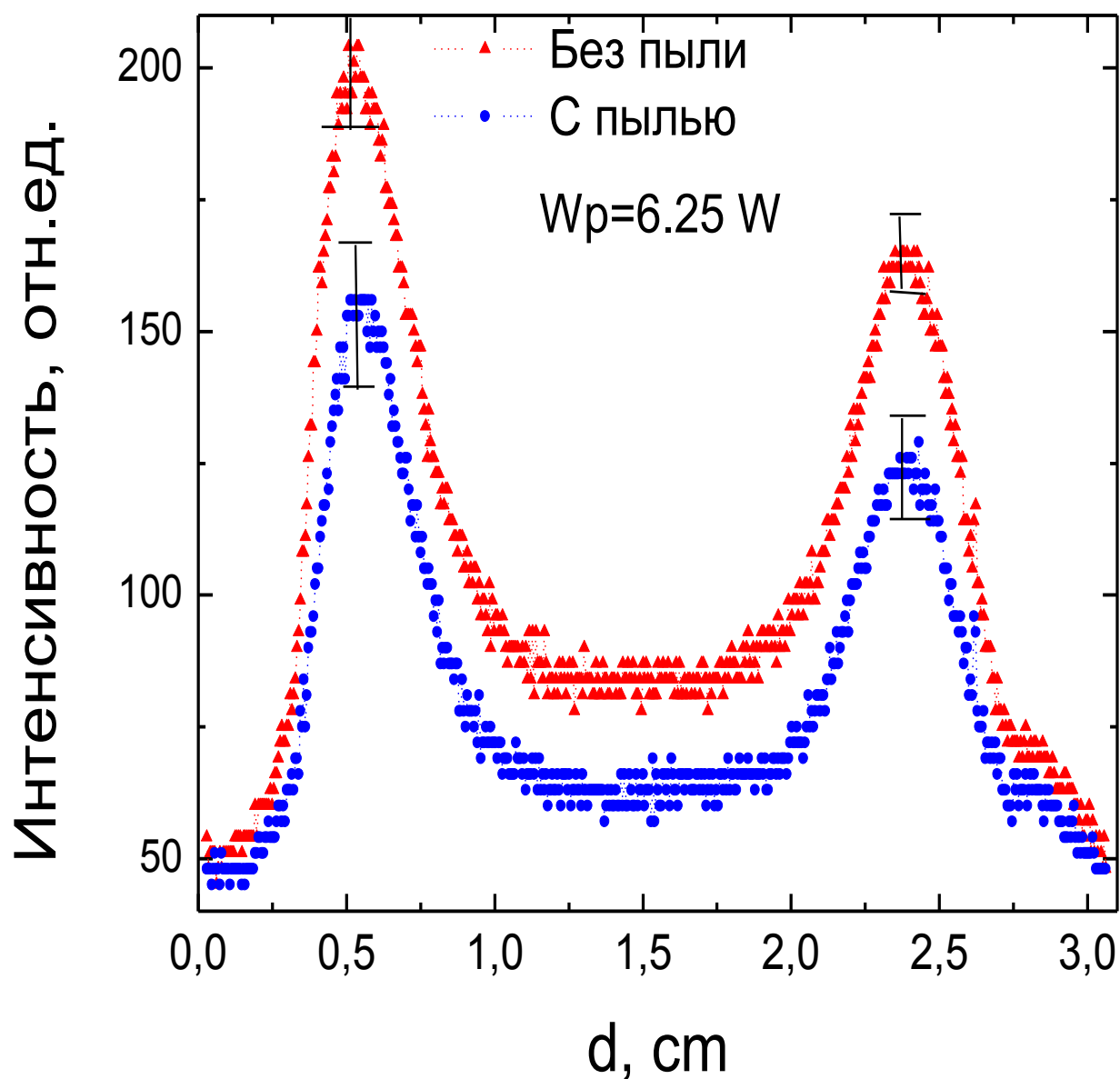


Рисунок 3.21 - Пространственное распределение интенсивности спектральных линий аргона в отсутствие и в присутствии пылевых частиц в плазме при давлении $p = 0.125$ торри и мощности разряда $W_p = 6.25$ Вт

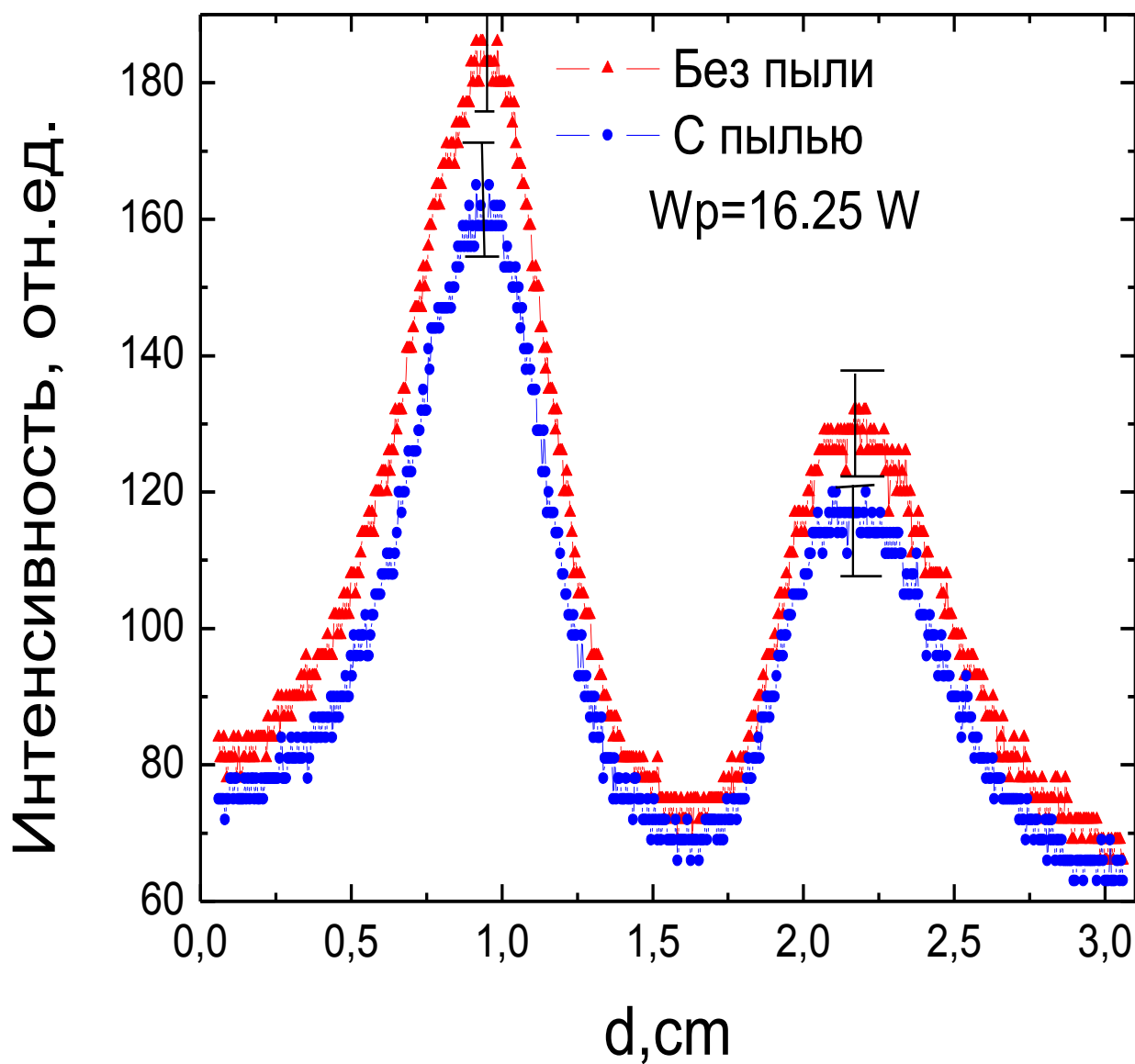


Рисунок 3.22 - Пространственное распределение интенсивности спектральных линий аргона в отсутствие и в присутствии пылевых частиц в плазме при давлении $p = 0.125$ торри и мощности разряда $W_p = 16.25$ Вт

3 RESEARCHES OF STRUCTURAL, DYNAMIC AND OPTICAL PROPERTIES OF DUSTY PLASMA IN RF DISCHARGE

3.1 Structural and dynamic properties of dusty plasma in RF discharge

It was observed that the value of discharge power affects the structure of a dust cloud. From the analysis of the trajectories of dust particles the pair correlation functions for different values of the discharge power were obtained. Comparison of radial distribution functions showed that the structure of the dust cloud becomes more disorderly with increasing the power.

To characterize the dynamic properties of the dust formation the dust particle velocity distribution were calculated. Analyzing the data, it can be noted that the velocity distribution of dust particles corresponds to the Maxwell distribution. It has been observed that by increasing the RF discharge power the temperature of the dust particles becomes grow and the number of dust particles with high kinetic energy increases. A study of the diffusion of dust particles in buffer plasma was carried out, for this purpose the series of experiments with the dusty plasma were conducted. The movements of dust particles in the horizontal sections of the dust cloud structure were recorded with help of video camera and the obtained trajectories of the particles were treated with the help of special computer programs. Video records were made in argon plasma at a constant gas pressure and at different values of the discharge power. The diffusion coefficient of the dust particles was obtained with help of the trajectory of dust particles according to the formula for time dependence of ratio of mean square particles displacement to the observation time, this value increases with increasing discharge power. Also from the Einstein relation, the diffusion coefficient for non-interacting particles was calculated. It was determined that the ratio D_{msd}/D_0 decreases with increasing temperature. The increasing of temperature leads to grows of dust particles charge and the interaction becomes stronger. Thus, there is a temperature region where its grows leads to increasing of the coupling parameter, which in its turn significantly reduces the diffusion coefficient with respect to the value of an ideal gas.

3.2 Optical properties of dusty plasma in RF discharge

The optical spectra of plasma at fixed pressures of buffer gas, but at different RF discharge power were investigated. It was observed that increasing the discharge power leads to increasing the intensity of the spectral lines of argon.

Using obtained spectra from the ratio of intensities of the two atomic (or two ionic) lines the temperature and the concentration of electrons at different gas pressures were determined. The obtained data indicates the non-monotonic change of the plasma characteristics in the studied range. Thus, the electron temperature increases with the grows of pressure in the range (0.2 - 0.6) torr and monotonously decreases in the range (0.7 - 2.0) tor. This behavior can be explained by the increasing role of the neutral component of the buffer gas as the pressure increases, as the change of concentration of the charged component is negligible. At low pressures of the buffer gas, "pumping" of energy from the alternating electric field to electrons

is effective due to the rather rare collisions with neutrals. At high gas pressures collisions with them become sufficiently frequent and it leads to cooling of the electrons (ionic and buffer gas component are at room temperature).

In this work we investigated the influence of the dust component to the properties of the buffer plasma. The intensities of argon plasma spectral lines before and after the injection of dust particles were investigated. Analysis of the obtained data showed that the adding of micron-sized dust particles leads to decreasing of intensity of argon spectral lines. This indicates a significant impact of dust particles to the properties of plasma in RF-discharge . One of the possible mechanisms of the effect is the absorption of fast electrons on the dust particles, due to which the electron temperature decreases. Also absorption of electrons by dust particles reduces concentration of electron in the plasma volume and as a consequence decrease the intensity of the spectral lines.

3. STRUCTURES ET PROPRIETES DYNAMIQUES ET OPTIQUES D'UN PLASMA POUSSIÉREUX DE DÉCHARGE RF

3.1 Propriétés structurales et dynamiques d'un plasma poussiéreux de décharge RF

Nous avons observé que la valeur de la puissance de décharge affecte de façon substantielle la structure d'un nuage de poussière. De l'analyse de la trajectoire des particules de poussière les fonctions de corrélation de paires à différentes valeurs de la puissance injectée pour réaliser la décharge ont été obtenues. La comparaison des fonctions de distribution radiale a montré que la structure du nuage de poussière devient plus désordonnée avec l'augmentation de la puissance.

Afin de caractériser les propriétés dynamiques de la formation de poussière, la distribution de vitesse des particules de poussière a été déterminée au cours du processus de croissance. L'analyse des données nous a permis de noter que la distribution de vitesse des particules de poussière correspond à la distribution de Maxwell-Boltzmann. Il a aussi été observé que, en augmentant la puissance de la décharge RF, la température des particules de poussière augmente et que le nombre de particules ayant une plus haute énergie cinétique augmente aussi. Une étude de la diffusion des particules de poussière dans le plasma du gaz tampon, ici l'argon, a été réalisé, à cet effet, plusieurs séries d'expériences ont été réalisées. Les mouvements des particules de poussière dans les sections horizontales de la structure du nuage de poussière ont été enregistrés à l'aide d'une caméra vidéo et les trajectoires des particules obtenues ont été traitées à l'aide de programmes informatiques spéciaux développés au laboratoire à l'université d'Almaty. Les enregistrements vidéo ont été réalisés dans un plasma d'argon à une pression constante et à différentes valeurs de la puissance de décharge. Le coefficient de diffusion des particules de poussière a été obtenu avec l'aide de la trajectoire des particules de poussière selon la formule de la dépendance temporelle du rapport de la valeur quadratique moyenne du déplacement des particules et de la durée d'observation. Cette valeur augmente avec la puissance de décharge. Aussi à partir de la relation d'Einstein, le coefficient de diffusion, pour les particules qui n'interagissent pas, a été calculé. On a déterminé que le rapport D_{msd}/D_0 diminue lorsque la température augmente. L'augmentation de la température conduit à l'augmentation de la charge portée par les particules et leur interaction devient plus forte. Ainsi, il existe une plage de température qui conduit à l'augmentation du paramètre de couplage, qui, à son tour, réduit de manière significative le coefficient de diffusion par rapport à sa valeur dans un gaz parfait.

3.2 Propriétés optiques d'un plasma poussiéreux dans une décharge RF

Les spectres d'émission optique du plasma, à des pressions fixes du gaz tampon, pour différentes puissances de décharge RF ont été étudiés. Il a été observé que l'augmentation de la puissance de décharge conduit à augmenter l'intensité des raies spectrales de l'argon.

A partir des spectres obtenus et du rapport des intensités des deux raies atomiques (ou ioniques) nous avons déterminé la température et la concentration électroniques à différentes pressions. Les données obtenues indiquent la variation non monotone des caractéristiques du plasma dans la gamme étudiée. Ainsi, la température des électrons augmente avec l'augmentation de la pression dans l'intervalle (0,2-0,6) Torr et diminue de façon monotone dans la plage de (0,7 à 2,0) Torr. Ce comportement peut être expliqué par le rôle de plus en plus important de la composante neutre du gaz tampon lorsque la pression augmente, comme la variation de la concentration de la composante chargée est négligeable. Aux basses pressions du gaz tampon, le gain d'énergie à partir du champ électrique alternatif par les

électrons est efficace en raison des collisions avec les neutres plutôt rares. À des pressions de gaz élevées la fréquence de collisions devient plus élevée et cela conduit à un refroidissement des électrons (les ions et les espèces neutres du gaz étant à la température ambiante).

Dans ce travail, nous avons étudié l'influence de la composante de poussière sur les propriétés du plasma. Les intensités des raies spectrales de l'argon, avant et après l'injection des particules de poussière, ont été étudiées. L'analyse des données obtenues a montré que l'ajout de particules de poussière dont la taille est l'ordre du micromètre conduit à une diminution de l'intensité des raies spectrales de l'argon. Ceci indique un effet significatif des particules de poussière sur les propriétés du plasma de décharge RF. L'un des mécanismes possibles de l'effet est l'attachement d'électrons rapides sur les particules de poussières, en raison de laquelle la température des électrons diminue. De plus l'attachement électronique par des particules de poussière réduit la concentration des électrons dans le volume de plasma et par conséquent de diminuer l'intensité des raies spectrales.

4 ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ПЫЛЕВОЙ ПЛАЗМЫ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО РАЗРЯДА С ПОМОЩЬЮ МНОГО УГЛОВОГО РАССЕЯНИЯ

4.1 Теоретические основы метода много углового рассеяния

Прежде всего, необходимо дать некоторое описание задачи о рассеянии света слоем пылинок. Следуя, работе [16], введем падающее излучение E_i и рассеянное E_s излучение на пылинках (см. рисунок 4.1). Электромагнитную мощность, принимаемую приемником D , обозначим через U . Если частицы удалить, то мощность, принятая приемником будет U_0 . При этом $U_0 > U$, т.е. наличие пылинок привело к затуханию (экстинкции) падающего излучения. Если бы буферная плазма, в которую помещены пылинки, являлась бы непоглощающей, то разность $U_0 - U$ определялась бы только поглощением в частицах и рассеянием на них.

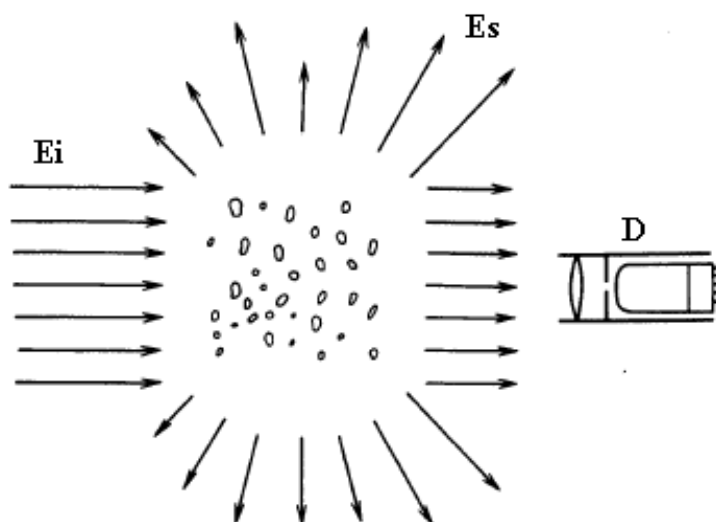


Рисунок 4.1 – Затухание света при прохождении через скопление частиц

Эта экстинкция зависит от химического состава частиц, их размеров, формы, числа частиц, поляризации и частоты падающего света. Вместе с тем существуют общие закономерности, справедливые для частиц всех типов. Остановимся на них. Для непоглощающей среды сечение экстинкции света на отдельной частице σ_{ext} можно записать в виде суммы сечения поглощения σ_{abs} и сечения рассеяния σ_{sca} :

$$\sigma_{ext} = \sigma_{sca} + \sigma_{abs} \quad (4.1)$$

Можно также определить эффективности экстинкции, рассеяния и поглощения на отдельной частице:

$$Q_{ext} = \frac{\sigma_{ext}}{\pi a^2}, \quad Q_{sca} = \frac{\sigma_{sca}}{\pi a^2}, \quad Q_{abs} = \frac{\sigma_{abs}}{\pi a^2} \quad (4.2)$$

При измерении экстинкции скоплением малых частиц на практике сечения скоплений частиц в большинстве случаев являются аддитивными величинами. Так в слое частиц толщиной L интенсивность падающего пучка света затухает по закону

$$I_{ext} = I_0 \exp(-\alpha_{ext} L), \quad (4.3)$$

Где коэффициент затухания α_{ext} равен

$$\alpha_{ext} = n_d \sigma_{ext} = n_d \sigma_{sca} + n_d \sigma_{abs}, \quad (4.4)$$

Здесь n_d - концентрация малых частиц.

Для нахождения этих характеристик необходимо вычислить коэффициенты рассеянного поля $\hat{a}_n$ и b_n :

$$\hat{a}_n = \frac{\mu m^2 j_n(mx) [x j_n(x)]' - \mu_1 j_n(mx) [m x j_n(x)]'}{\mu m^2 j_n(mx) [x h_n^{(1)}(x)]' - \mu_1 h_n^{(1)}(mx) [m x j_n(x)]'} \quad (4.5)$$

$$b_n = \frac{\mu_1 j_n(mx) [x j_n(x)]' - \mu j_n(mx) [m x j_n(x)]'}{\mu_1 j_n(mx) [x h_n^{(1)}(x)]' - \mu h_n^{(1)}(mx) [m x j_n(x)]'} \quad (4.6)$$

И коэффициенты поля внутри частицы c_n и d_n :

$$c_n = \frac{\mu_1 j_n(x) [x h_n^{(1)}(x)]' - \mu_1 h_n^{(1)}(x) [x j_n(x)]'}{\mu_1 j_n(mx) [x h_n^{(1)}(x)]' - \mu h_n^{(1)}(x) [m x j_n(mx)]'} \quad (4.7)$$

$$d_n = \frac{\mu_1 m j_n(x) [x h_n^{(1)}(x)]' - \mu_1 m h_n^{(1)}(x) [x j_n(x)]'}{\mu m^2 j_n(mx) [x h_n^{(1)}(x)]' - \mu_1 h_n^{(1)}(x) [m x j_n(mx)]'} \quad (4.8)$$

где штрих означает дифференцирование по аргументу, стоящему в круглых скобках, а через x и m обозначены соответственно параметр дифракции и относительный показатель преломления:

$$x = ka_d = \frac{2\pi Na_d}{\lambda} \quad m = \frac{k_1}{k} = \frac{N_1}{N} \quad (4.9)$$

N_1 и N - показатели преломления частицы и среды соответственно.

$j_n(x)$ и $y_n(x)$ - сферические бесселевы функции,

$h_n^{(1)}(x) = j_n(x) + iy_n(x)$ - сферические функции Ганкеля.

$$\sigma_{sca} = \frac{2\pi}{k^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1)(|a_n|^2 + |b_n|^2) \quad (4.10)$$

$$\sigma_{ext} = \frac{2\pi}{k^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) \operatorname{Re}(a_n + b_n) \quad (4.11)$$

Сечение поглощения может быть выражено с одной стороны как $\sigma_{abs} = \sigma_{ext} - \sigma_{sca}$, вместе с тем с помощью коэффициентов c_n и d_n оно выражается следующим образом:

$$\sigma_{abs} = \frac{\pi a_d^2 \varepsilon''}{x^2} \int_0^{x^2} \sum_{n=1}^{\infty} (m_n |c_n|^2 + n_n |d_n|^2) x'^2 dx', \quad (4.12)$$

Где $x' = xk$,

$$m_n = 2(2n+1) |j_n(x)|^2 \quad (4.13)$$

$$n_n = 2n(2n+1) \left\{ (n+1) \left| \frac{j_n(x)}{x} \right|^2 + \left| \frac{x j_n(x)}{x} \right|^2 \right\} \quad (4.14)$$

Суммы (4.10), (4.11) и (4.12) ограничиваются, согласно [16], членом

$$n_{\max} = x + 4x^{1/3} + 2 \quad (4.12)$$

Необходимо отметить, что рассеяние зависит от углов. Обозначим через $i_{\parallel} = W_{\parallel} / I_0$ рассеянную интенсивность, приходящуюся на единичную падающую интенсивность, при условии, что падающий свет поляризован параллельно

плоскости рассеяния, и через $i_{\perp} = W_{\perp} / I_0$ - рассеянную интенсивность для падающего света, поляризованного перпендикулярно плоскости рассеяния:

$$i_{\parallel} = |S_2|^2, \quad (4.13)$$

$$i_{\perp} = |S_1|^2, \quad (4.14)$$

где

$$S_1 = \sum_n \frac{2n+1}{n(n+1)} (a_n \pi_n + b_n \tau_n) \quad (4.15)$$

$$S_2 = \sum_n \frac{2n+1}{n(n+1)} (a_n \tau_n + b_n \pi_n) \quad (4.16)$$

Здесь τ_n, π_n - функции, зависящие от угла θ . Они легко вычисляются из рекуррентных соотношений:

$$\pi_n = \frac{2n-1}{n-1} \mu \pi_{n-1} - \frac{n}{n-1} \mu \pi_{n-2}, \quad \tau_n = n \mu \pi_n - (n+1) \pi_{n-1}, \quad (4.17)$$

где $\mu = \cos(\theta)$, начиная с $\pi_0 = 0$ и $\pi_1 = 1$.

Поляризацию рассеянного света описывает степень поляризации $P = (i_{\perp} - i_{\parallel}) / (i_{\perp} + i_{\parallel})$. Независимо от размера и состава шара $P(0^\circ) = P(180^\circ) = 0$. На рисунке 4.2 даны графики $i_{\perp}$, $i_{\parallel}$ в полярных координатах, полученные при исследовании рассеяния света с длиной волны 0.55 мкм водяной каплей с параметром $x=3$. На этой длине волны показатель преломления воды равен $m = 1.33 + i10^{-5}$. Из этого рисунка видно, что рассеяние концентрируется в направлении вперед. Рассеянная интенсивность во много раз превышает рассеяние на углы $\theta > 90^\circ$. На рисунке 4.3 представлены логарифмы $i_{\perp}$ и $i_{\parallel}$, а на рисунке 4.4 – поляризация.

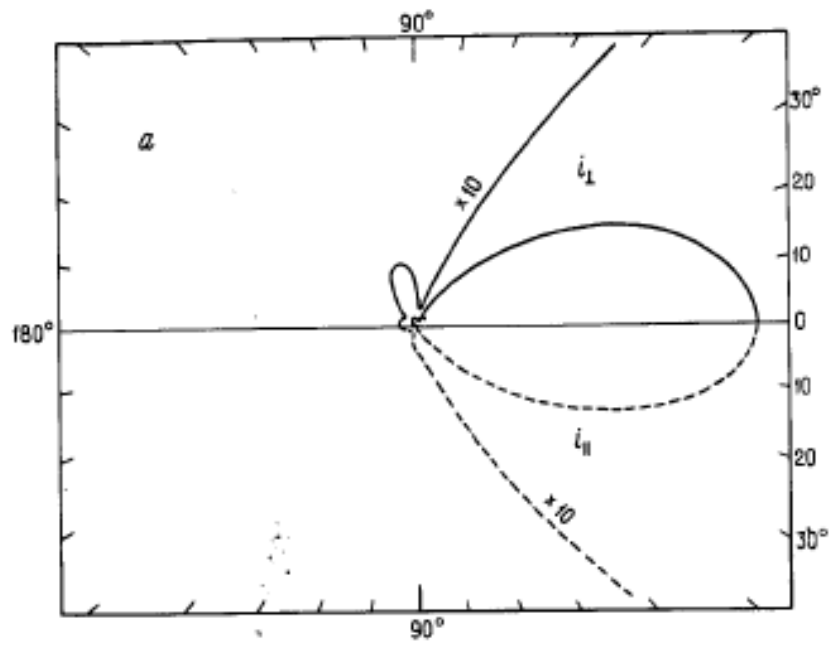


Рисунок 4.2 – Рассеяние шаром при $x=3$ и $m=1.33+i10^{-5}$

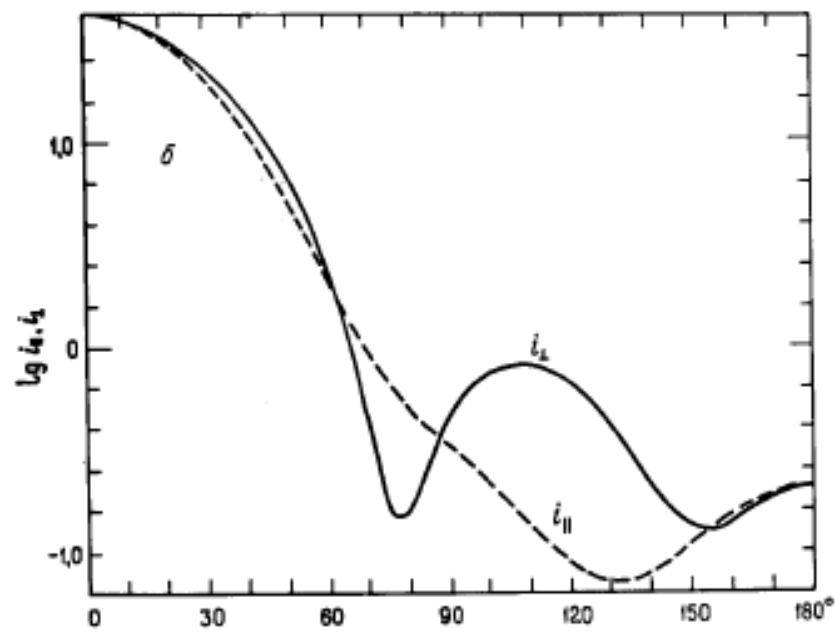


Рисунок 4.3 – Логарифмы $i_{\perp}$ и $i_{\parallel}$

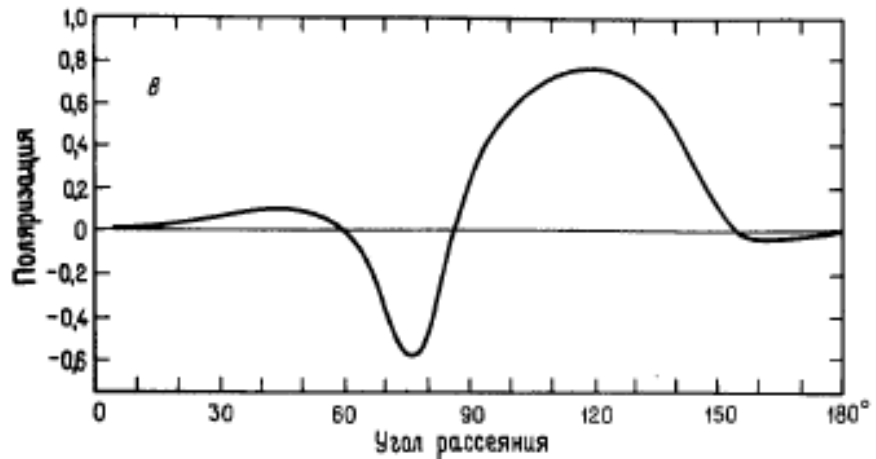


Рисунок 4.4 –Поляризация

Как уже отмечалось в первой части диссертации, при описании рассеяния света малыми частицами с радиусами $a_d < 0.1\lambda$ используются приближенные выражения Рэлея-Ганса, которые выводятся из теории Ми для предельного случая малых частиц. Они позволяют ускорить расчеты и обойти вопросы о сходимости рядов, плохом поведении функции Бесселя и количестве значащих цифр. Выражения для сечений рассеяния и поглощения в рамках теории Рэлея-Ганса даны в первой части (уравнения (1.5) и (1.7)).

В работе [79] описан еще один метод определения размеров и концентрации частиц по измерениям на 2 углах, один из которых является опорным (reference). Данный метод основан на применении теории Рэлея-Ганса к фрактальным агрегатам, т.е. структур, состоящих из практически одинаковых частиц [80-82]. Такие структуры подчиняются отношению

$$N_p = k_f \left(\frac{R_g}{a_d} \right)^{D_f}, \quad (4.18)$$

где N_p - число первичных частиц в структуре, D_f - фрактальный размер, k_f - фрактальный фактор, R_g - радиус вращения структуры.

В данном методе дифференциальное сечение рассеяния света всей фрактальной структуры $dC_{vv}^a / d\Omega$ определяется через дифференциальное сечение рассеяния одной частицей $dC_{vv}^p / d\Omega$

$$\frac{dC_{vv}^a}{d\Omega} = N_p^2 \frac{dC_{vv}^p}{d\Omega} f(q^2 R_g^2), \quad (4.19)$$

где q - абсолютное значение волнового вектора рассеяния и является функцией угла рассеяния θ

$$q(\theta) = \frac{4\pi}{\lambda} \sin(\theta/2) \quad (4.20)$$

Дифференциальное сечение рассеяния одной частицы зависит от размера, длины волны падающего излучения λ и массы частицы. Функция f называется структурным фактором. Различные выражения для этой функции могут быть найдены в работе [81].

Отношение рассеянной интенсивности на угле β к рассеянной интенсивности на угле α больше не зависит от сечений рассеяния первичной частицы, также не зависит от фрактального фактора k_f , это отношение является функцией только R_g , D_f и отношения структурных факторов $f(q^2(\beta)R_g^2)/f(q^2(\alpha)R_g^2)$, в случае монодисперсных частиц. Отношение R_g/a_d является функцией линейного размера структуры и ее фрактального размера, которые определяются непосредственно в каждом эксперименте. Угол α является опорным, можно провести измерения на нескольких углах по отношению к данному опорному и сравнить результаты.

В следующем пункте данной части диссертации будут представлены данные, полученные методом много углового рассеяния. Задача данного метода - найти две неизвестные величины (a_d, n_d) по независимым измерениям $(I_\alpha, I_\beta, I_{ext}/I_0)$ при следующих углах $\sim 22.5^\circ$, 45° и 0° . Будет использоваться метод, описанный выше, чтобы исследовать изменение во времени радиуса и плотности числа частиц. Для выбранных значений m' и m'' алгоритм ВМІЕ [16] будет рассчитывать сечения экстинкции, которые необходимо использовать для расчета концентрации частиц n_d по формуле (1.6).

4.2 Эксперимент, обработка данных и результаты

На установке, описанной в пункте 2.2 были выполнены эксперименты по исследованию характеристик пылевых образований в плазме с помощью многоуглового рассеяния света, проходящего через эти образования. Прежде чем переходить к описанию экспериментальных данных и результатов, остановлюсь на программе, позволяющей в рамках теории Ми рассчитать характеристики рассеяния света с заданными параметрами.

В MathLab была написана программа, рассчитывающая сечения экстинкции (эффективность экстинкции), поглощения и рассеяния, а также многие другие характеристики рассеяния, в том числе индикатрису рассеяния света при заданных значениях длины волны падающего света, коэффициента преломления рассеивающей среды m , относительного размера сферических рассеивающих частиц (параметра дифракции) $x = ka_d = \frac{2\pi a_d}{\lambda}$. Для проверки

работы программы была рассчитана эффективность экстинкции водяных капель. На рисунке 4.5 представлена зависимость эффективности экстинкции капли воды с $m = 1.33 + 5 \cdot 10^{-5}i$ от параметра дифракции, данный график идентичен графику, приведенному в работе [16]. На рисунках 4.6-4.8

приведены графики эффективности экстинкции, поглощения и рассеяния частиц сажи.

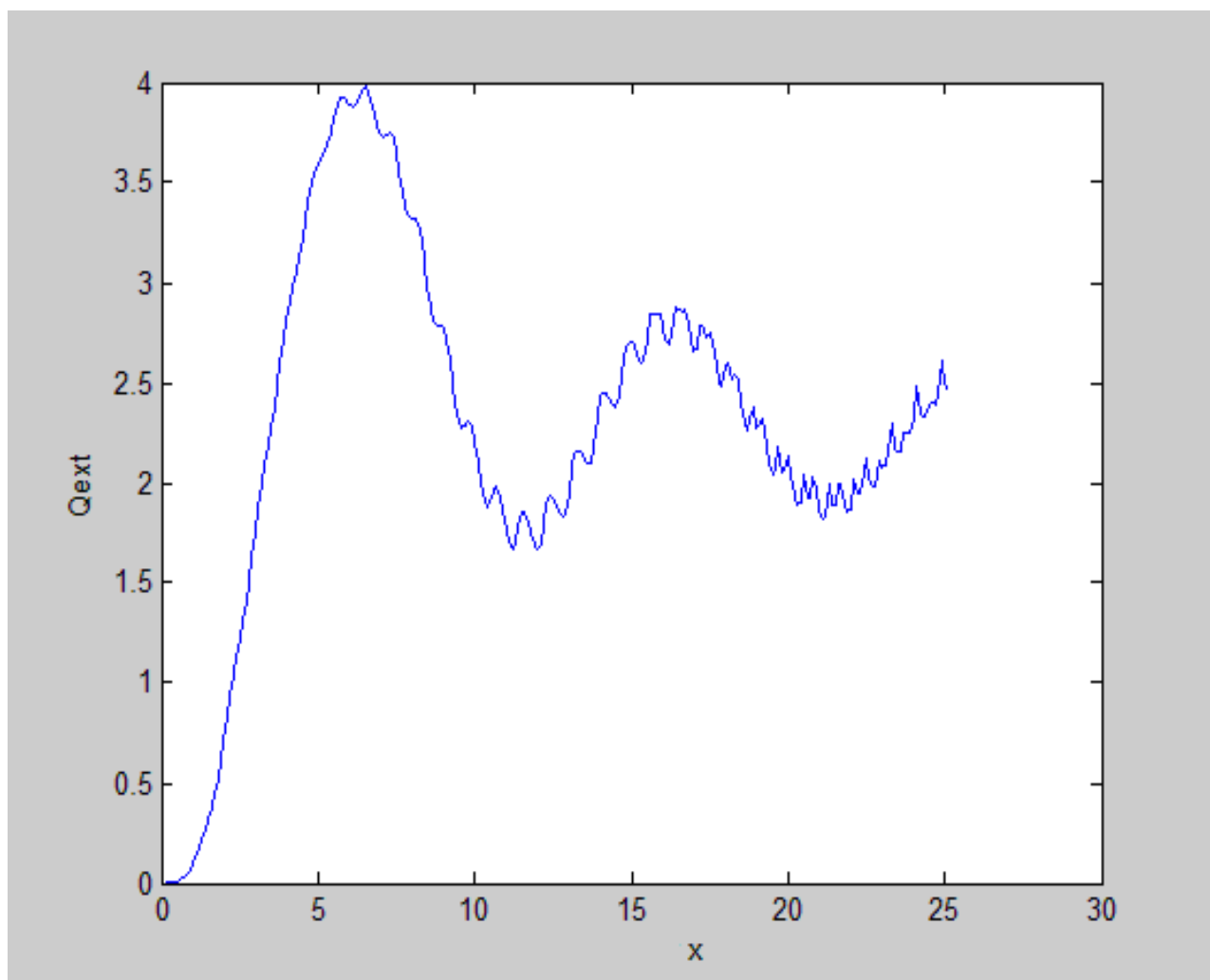


Рисунок 4.5 – Эффективность экстинкции капли воды

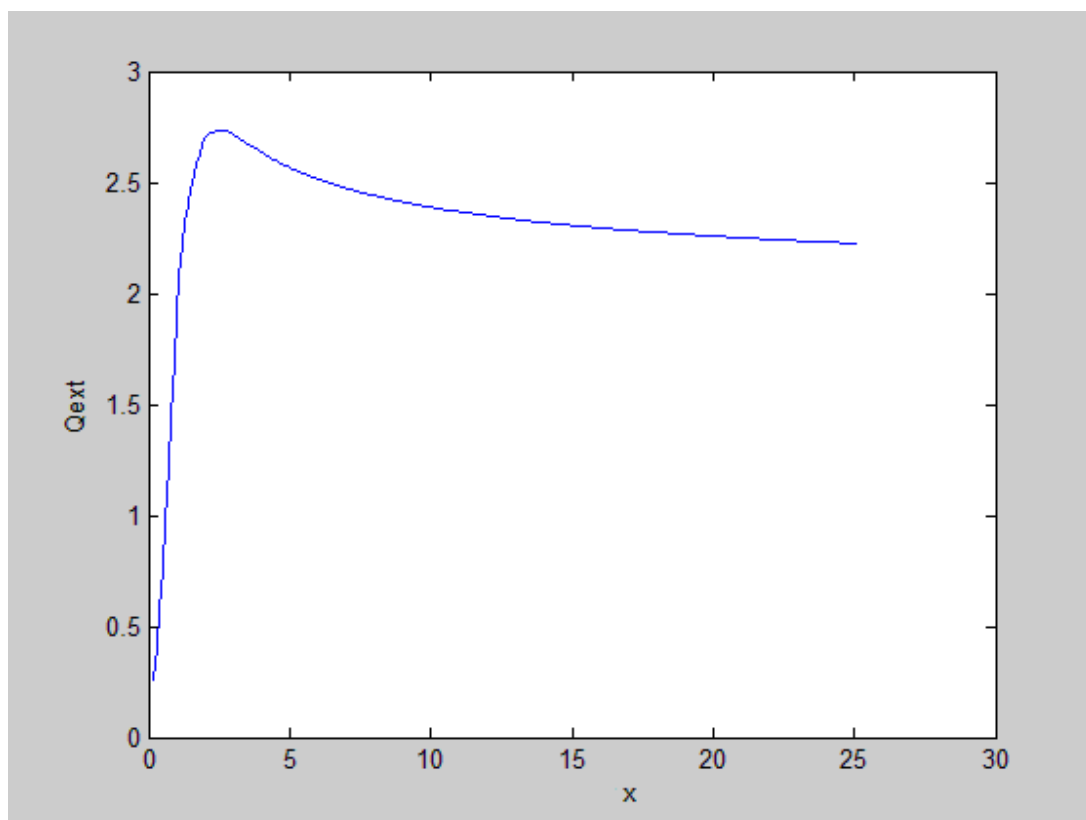


Рисунок 4.6 – Эффективность экстинкции частиц сажи с $m = 1.61 + 0.71i$

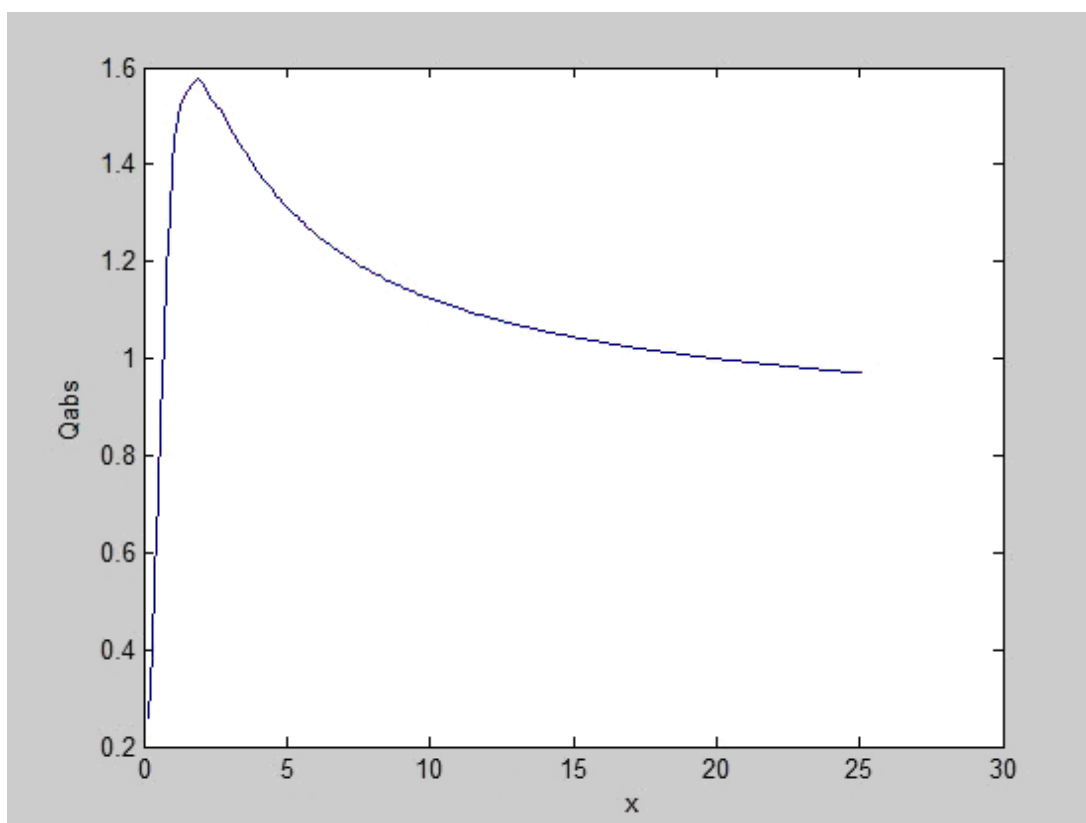


Рисунок 4.7 – Эффективность поглощения света частицами сажи с $m = 1.61 + 0.71i$

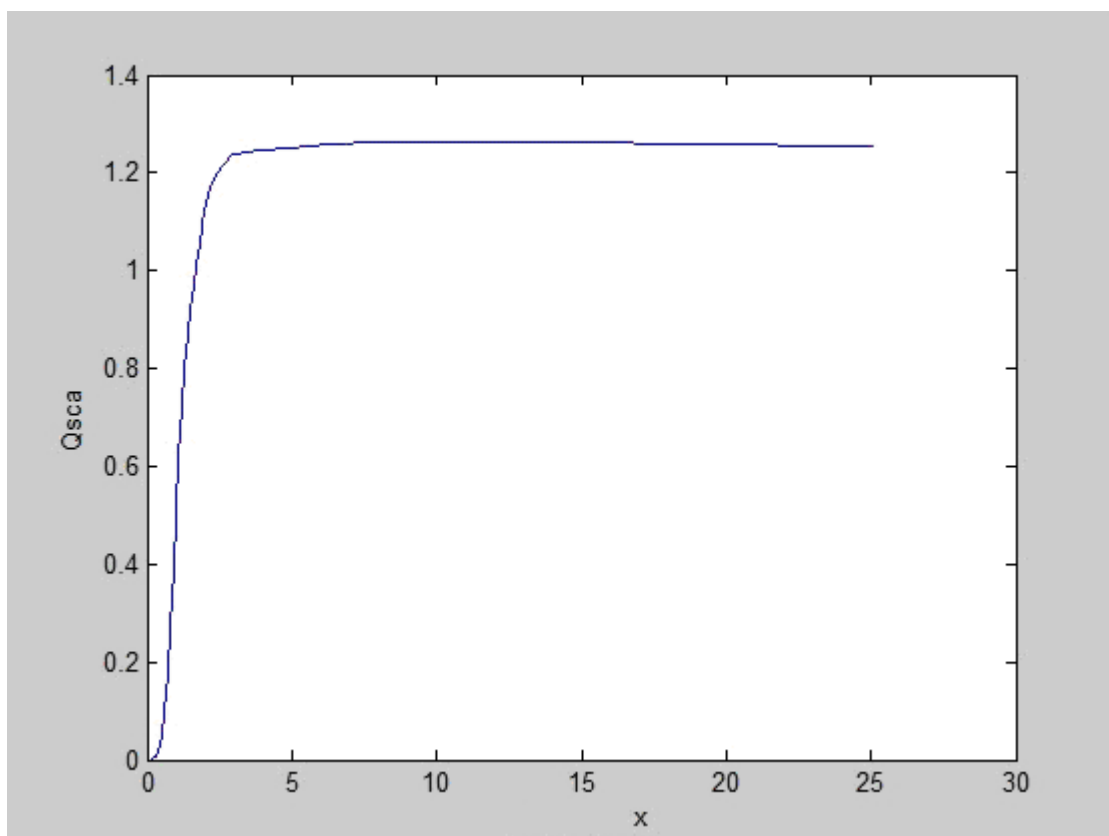


Рисунок 4.8 – Эффективность рассеяния света частицами сажи с $m=1.61+0.71i$

Результаты по индикатрисе рассеяния демонстрируются в виде круговой диаграммы, где в верхней части на углах от 0° до 180° представлена индикатриса рассеяния света с параллельной поляризацией, а в нижней части на углах от 180° до 360° представлена индикатриса рассеяния света с перпендикулярной поляризацией.

Коэффициент преломления сажи равен $m=1.7+0.6i$ либо $m=1.61+0.71i$. Расчеты для пылинок с относительным размером $x=0.1$ представлены на рисунках 4.9 и 4.12. Как видно из этого рисунка, при малых значениях параметра размера рассеяние света с параллельной поляризацией распределяется равномерно на все углы, а свет с перпендикулярной поляризацией не рассеивается на угле в 90° (270°). Индикатриса рассеянного света с перпендикулярной поляризацией имеет характерный лепестковый вид с нулем на 90° и 270° .

Из рисунков 4.9-4.11 и 4.12-4.14 видно, что с увеличением значения параметра размера наблюдается появление асимметрии в распределении интенсивности рассеянного света в сторону рассеяния вперед.

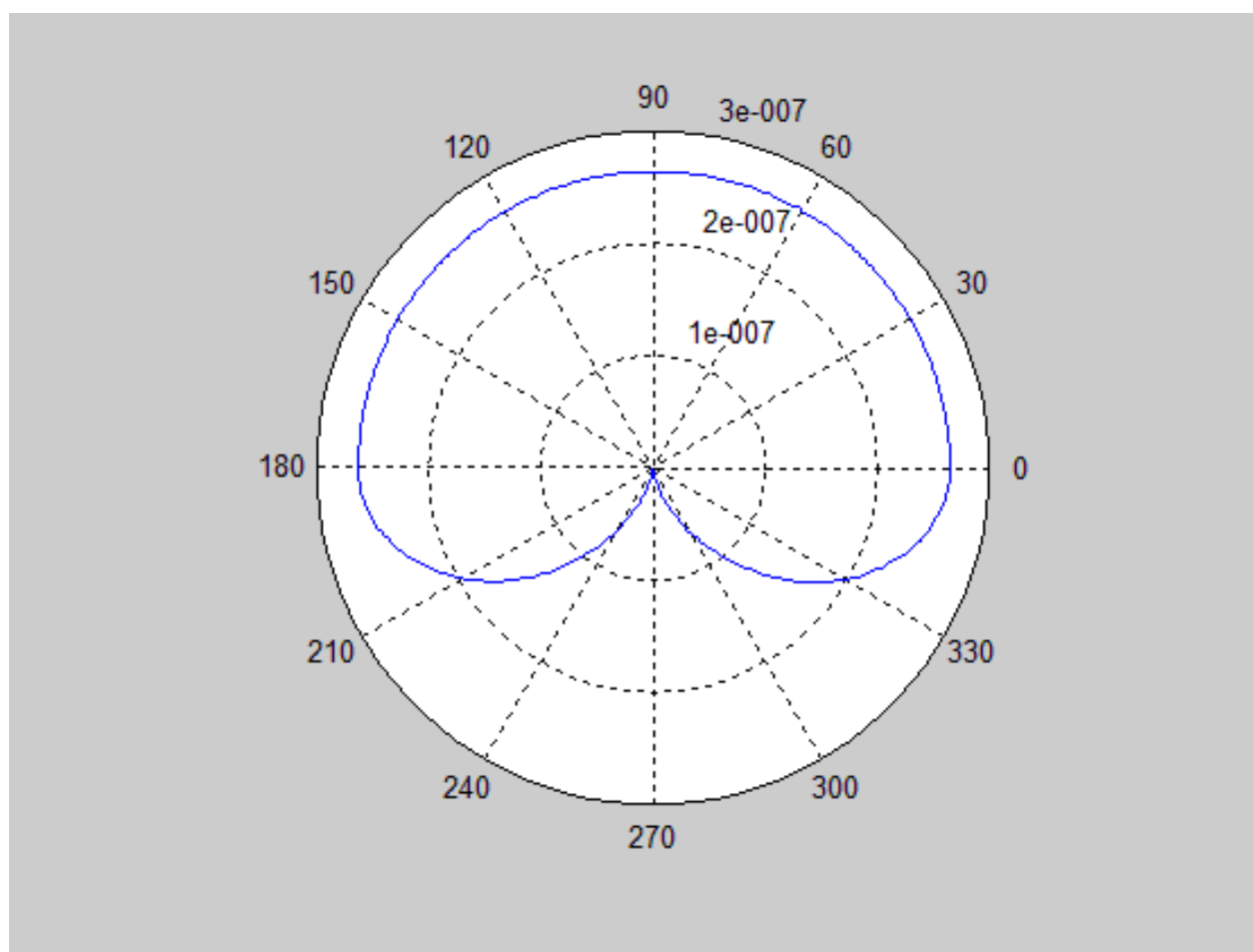


Рисунок 4.9 – Индикатриса рассеяния света при $m = 1.7 + 0.6i$ и $x = 0.1$

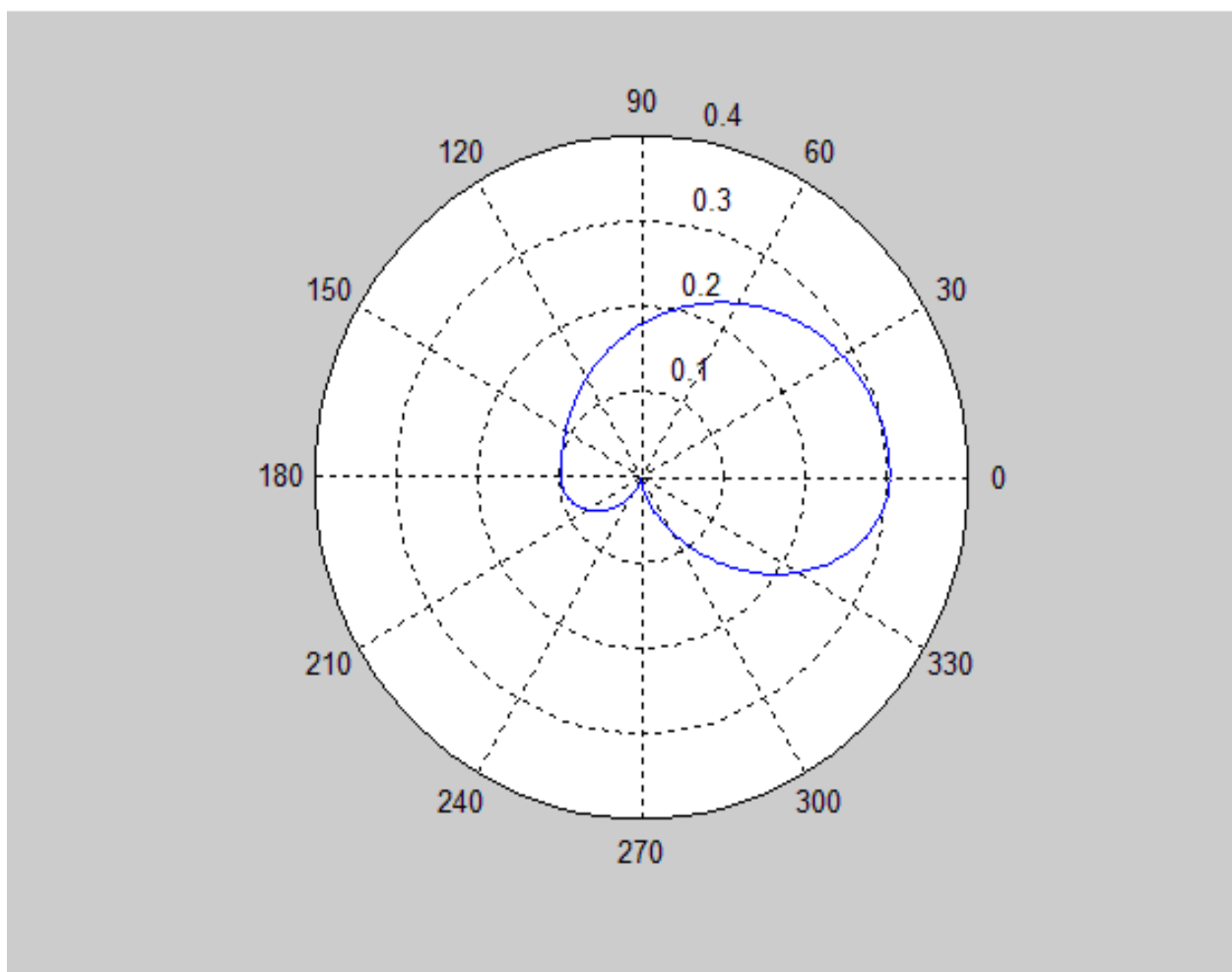


Рисунок 4.10 – Индикатриса рассеяния света при $m = 1.7 + 0.6i$ и $x = 1$

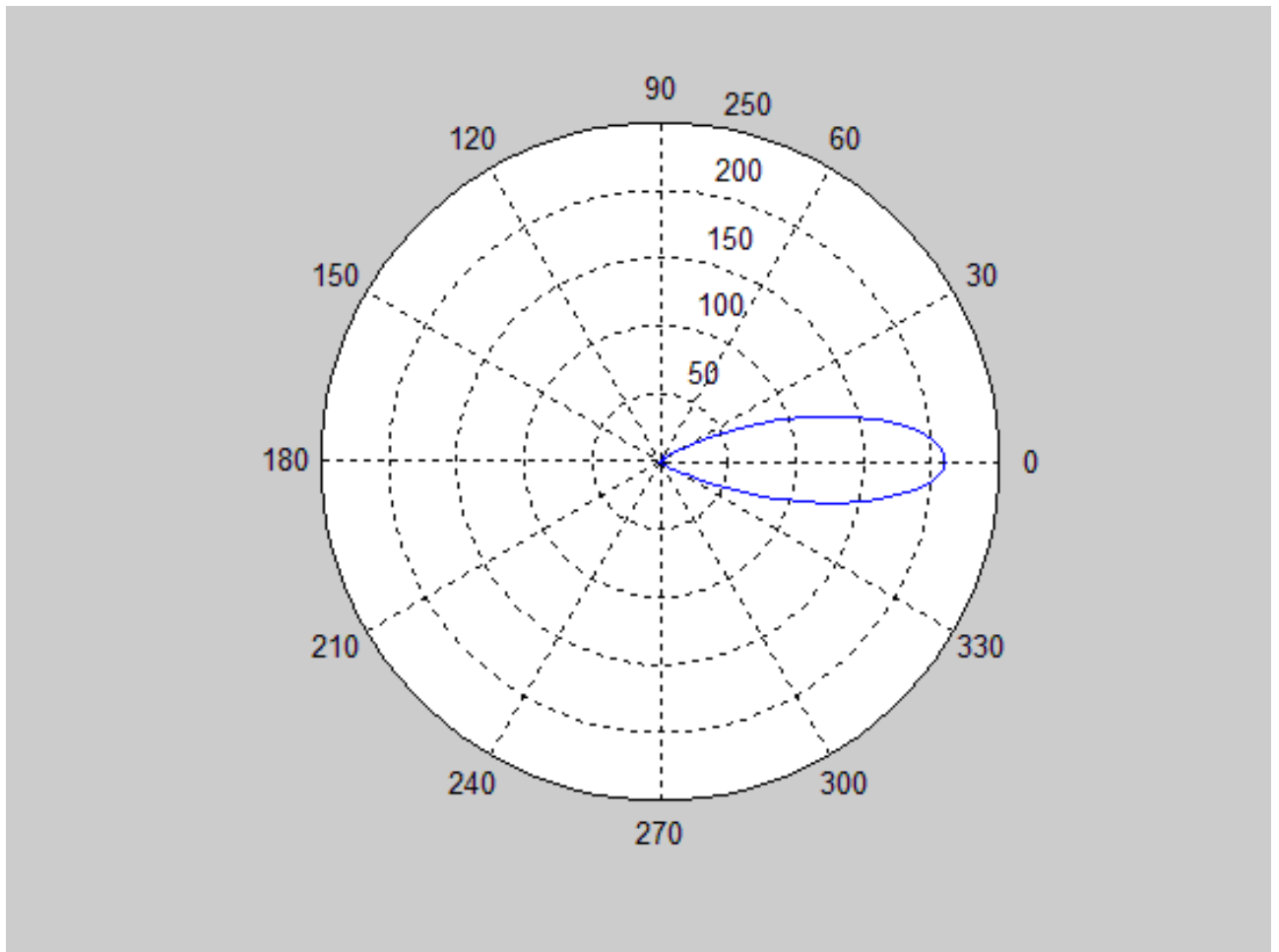


Рисунок 4.11 – Индикатриса рассеяния света при $m = 1.7 + 0.6i$ и $x = 4.72$

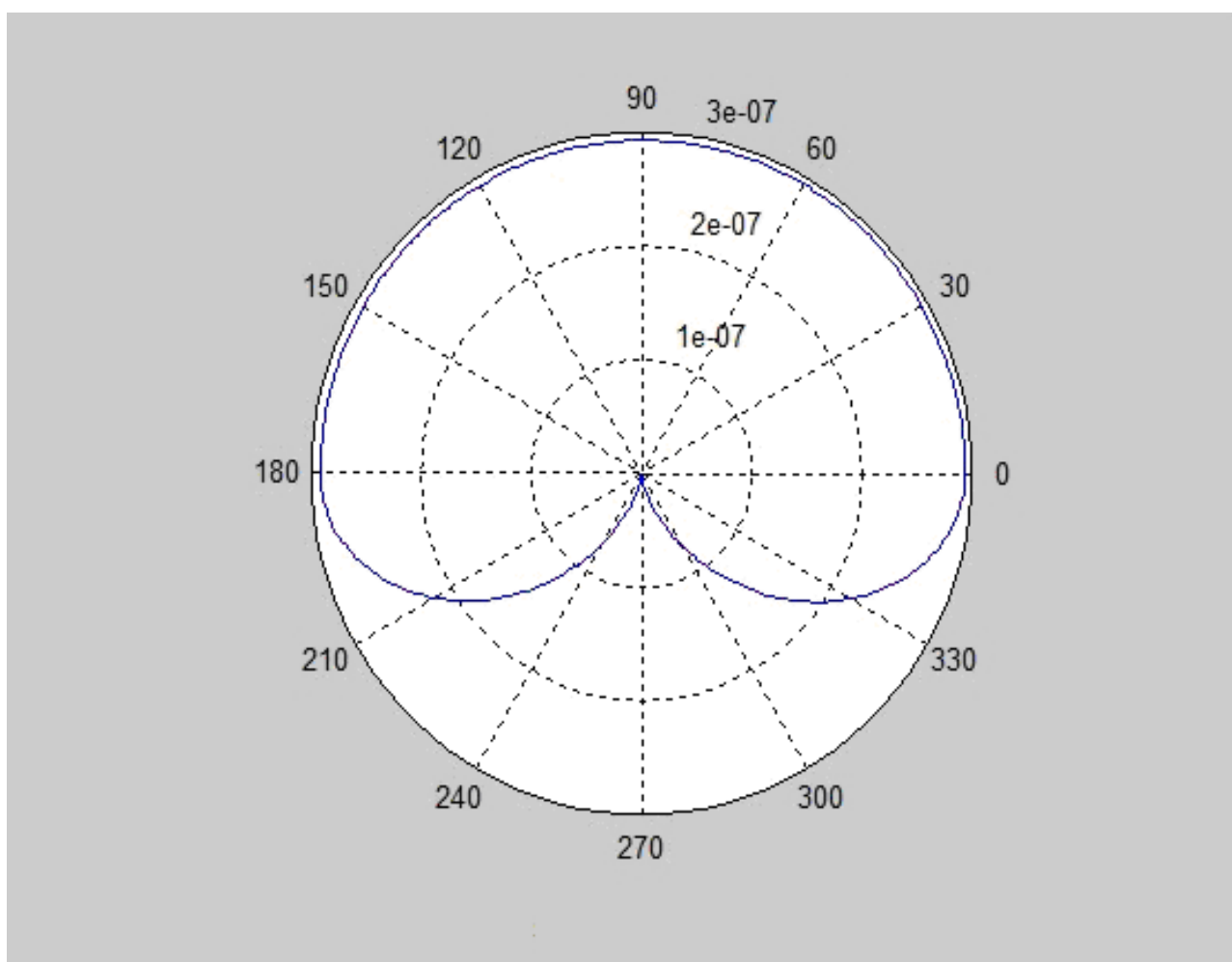


Рисунок 4.12 – Индикатриса рассеяния света при $m=1.61+0.71i$ и $x=0.1$

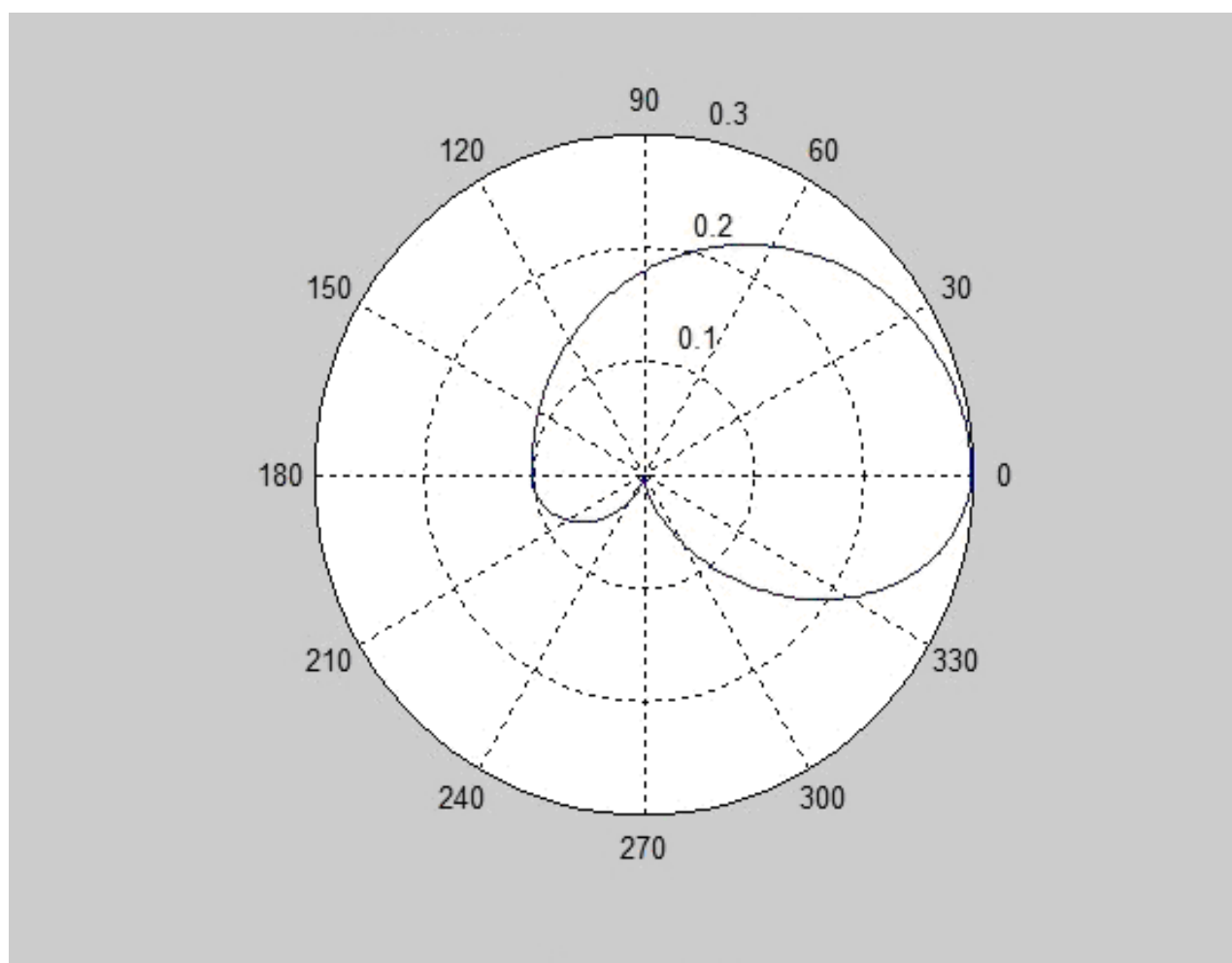


Рисунок 4.13 – Индикатриса рассеяния света при $m=1.61+0.71i$ и $x=1$

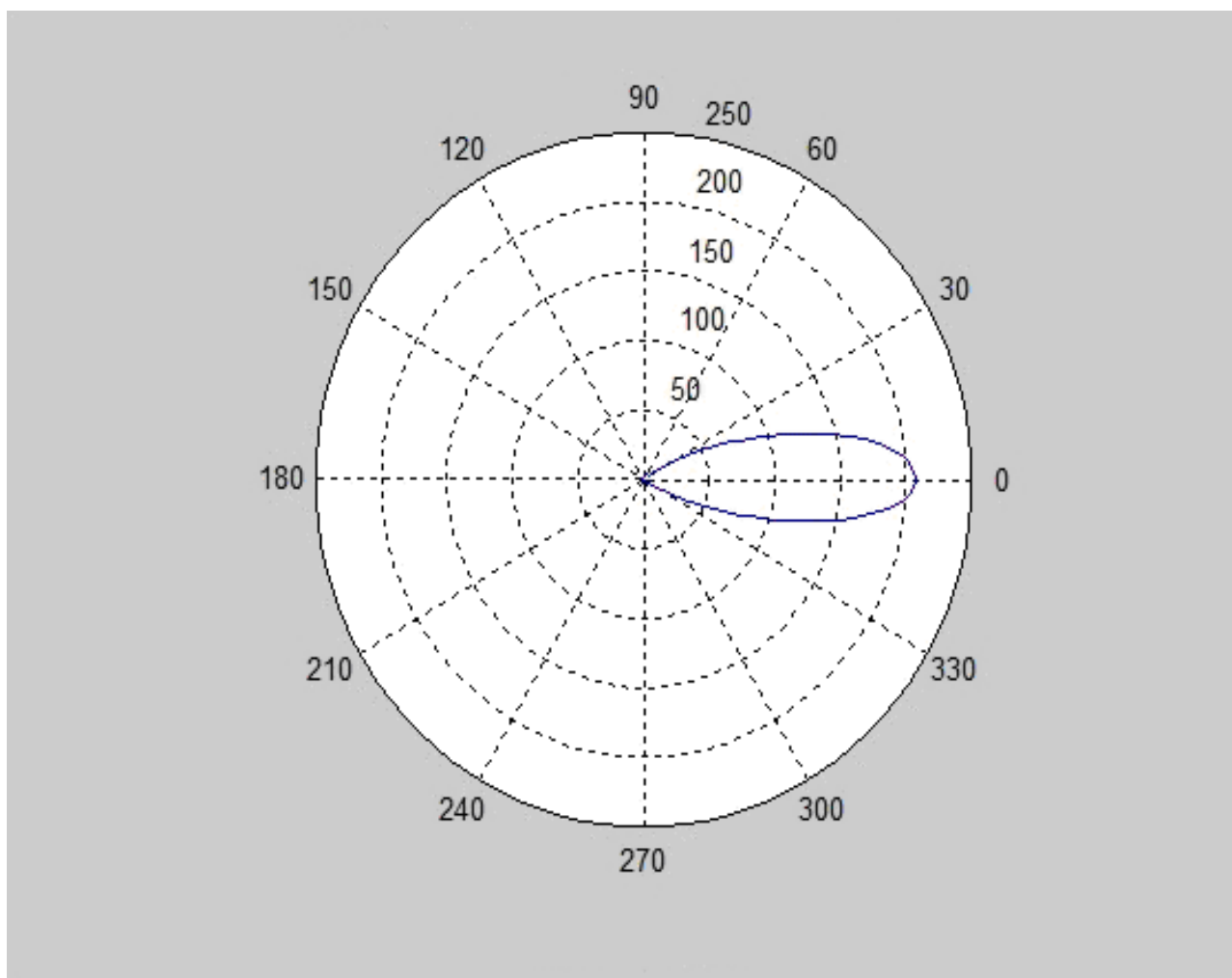


Рисунок 4.14 – Индикатриса рассеяния света при $m=1.61+0.71i$ и $x=4.72$

Итак, на экспериментальной установке, описанной в главе 2, были выполнены эксперименты по много угловому рассеянию света на пылевых образованиях в плазме ВЧ разряда в смеси аргона с добавлением ацетилена. Отличие от экспериментов, выполненных в главе 3, заключается в том, что пылевые частицы не вводятся извне, а образуются и растут непосредственно в химически активной плазме. Эксперименты были выполнены при разных параметрах разряда, таких как давление $p[\text{mbar}]$ и мощность разряда $W[\text{Вт}]$. Запись данных по интенсивностям рассеяния проводилась в течение нескольких минут, однако основные исследования данной работы касались малых времен до 3 мин.

Ниже на графиках представлены результаты проведенных экспериментов. Во-первых, на рисунке 4.15 представлен график временной зависимости интенсивности проходящего света на нуле градусов, т.е. график представляет собой затухание (экстинкцию) света, проходящего сквозь плазму, в которой образуются и растут (эволюционируют) углеводородные пылевые частицы. Стрелкой указывается момент, когда разряд выключается, частицы падают вниз камеры, и свет проходит уже без затухания, вызванного пылевыми частицами.

Таким образом, обозначим через I_0 значение интенсивности, указанной стрелкой.

На рисунках 4.16 и 4.17 представлены интенсивности рассеянного лазерного излучения на углах 22.5° , 45° и 90° при разных давлениях. Как видно из этого рисунка интенсивность рассеянного света постепенно растет, особенно на самом маленьком угле 22.5° , что свидетельствует о наличии рассеяния вперед, характерного для относительно крупных частиц (см. рис.4.14). На рисунке 4.18 представлены интенсивности рассеянного света лазерного излучения на угле 22.5° при $W=10$ Вт и давлениях: $p=0.2$ mbar и $p=0.5$ mbar. Видно, что при $p=0.5$ mbar формируются более крупные частицы. А наличие максимума на кривой интенсивности свидетельствует о том, что эти крупные частицы достигают критической массы, когда они уже не удерживаются электрическим полем и падают на дно камеры.

Полученные экспериментальные данные обрабатывались согласно описанному в пункте 4.2 методу. Напомним, что для вычисления размеров и концентраций пылинок был использован метод, основанный на определении отношения интенсивностей рассеянного света, измеренных на двух углах. Приведем основные уравнения данного метода. Пусть имеются интенсивности $I(\alpha)$ и $I(\beta)$. Амплитуда рассеянной волны на угле α [rad] равна

$$q(\alpha) = \frac{4\pi}{\lambda} \sin(\alpha / 2) \quad (4.21)$$

Поправка для угла α вычисляется по формуле

$$correction(\alpha) = -\frac{1}{230} + \frac{1}{380 \sin(\alpha)} \quad (4.22)$$

Для угла β [rad] выражения аналогичны. Далее, вычисляются следующие отношения

$$RI(\alpha, \beta) = \frac{I(\alpha)correction(\beta)}{I(\beta)correction(\alpha)} \quad (4.23)$$

$$Rq(\alpha, \beta) = \frac{1}{-(q(\alpha))^2 + (q(\beta))^2} \quad (4.24)$$

Тогда радиус вращения получается из следующего соотношения

$$Rg(\alpha, \beta) = \sqrt{3Rq(\alpha, \beta) \ln(RI(\alpha, \beta))} , \quad (4.25)$$

А радиус частиц в данном эксперименте определяется из соотношения

$$a_d(\alpha, \beta) = \frac{1}{\sqrt{3/5}} Rg(\alpha, \beta) \quad (4.26)$$

Для рассчитанных a_d и выбранного m написанная программа по рассеянию на основе Ми теории использовалась для расчета сечения экстинкции, которое необходимо для определения концентрации частиц n_d по формуле

$$n_d = \frac{-\ln(I_{ext}/I_0)}{\sigma_{ext}L} \quad (4.27)$$

$L = 10ci$ - горизонтальный размер пылевой структуры.

Были выбраны $\alpha = 22.5^\circ$ и $\beta = 45^\circ$. Эксперименты были выполнены по несколько раз для каждой комбинации параметров (давления и мощности разряда). Результаты представлены на рисунках 4.18- 4.19. На рисунке 4.18 представлены графики зависимости радиуса пылевых частиц от времени при $W=10$ Вт и $p=0.5$ мбар, полученные в двух независимых измерениях. Как видно из этого рисунка, наблюдается повторяемость результатов и отклонения не превышают 10%. На рисунке 4.19 представлены графики зависимости радиуса пылевых частиц от времени при $W=7.5$ Вт и $p=0.5$ мбар, полученные в двух независимых измерениях. Также наблюдается повторяемость результатов, и отклонение не превышает 10%. На рисунках 4.20 и 4.21 представлены эволюции радиуса частиц и их концентрации, соответственно. Показано, что рост пылевых частиц проходит несколько быстрее при увеличении давления.

Таким образом, в главе 4 описаны полученные в экспериментах данные об угловом рассеянии света на пылевых частицах. В рамках теории Рэлея-Ганса для фрактальных структур были рассчитаны размеры и концентрация частиц как функции от времени. В рамках теории Ми было рассчитано распределение рассеянного излучения в отдельно выбранный момент времени.

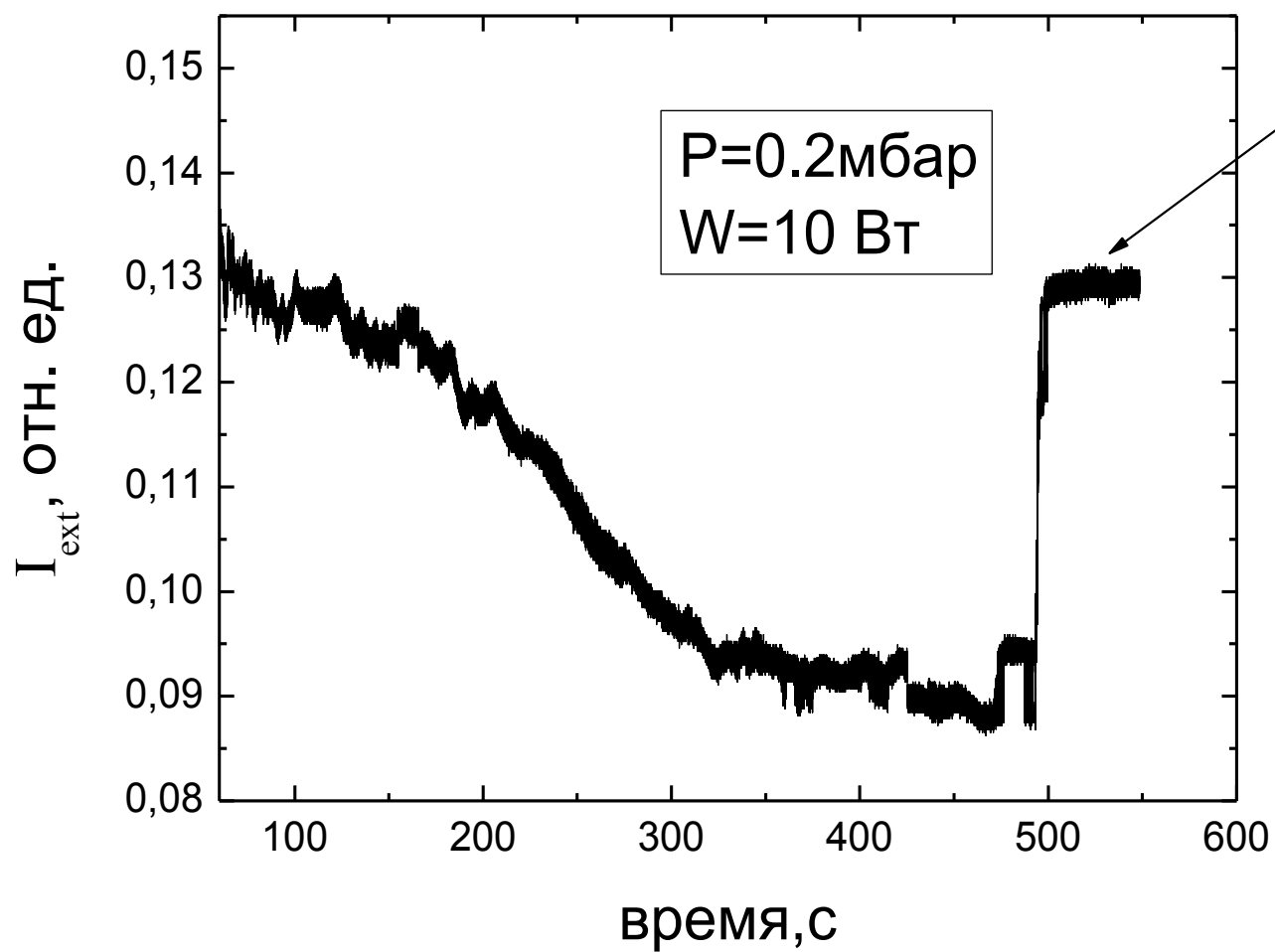


Рисунок 4.15 – Затухание лазерного луча, проходящего через слой плазмы с формирующимися пылевыми частицами

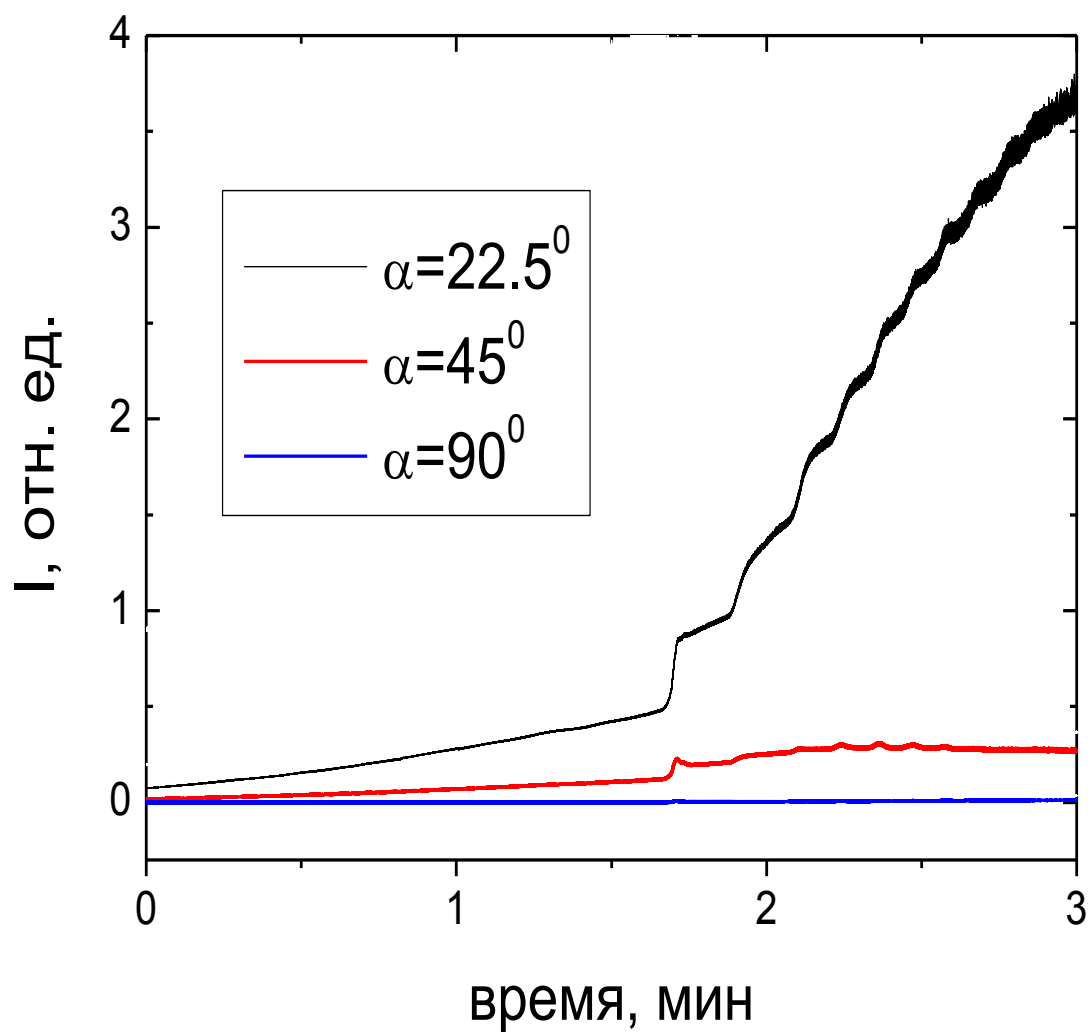


Рисунок 4.16 – Интенсивности рассеянного света лазерного излучения на трех разных углах, $W=10$ Вт, $p=0.2$ мбар

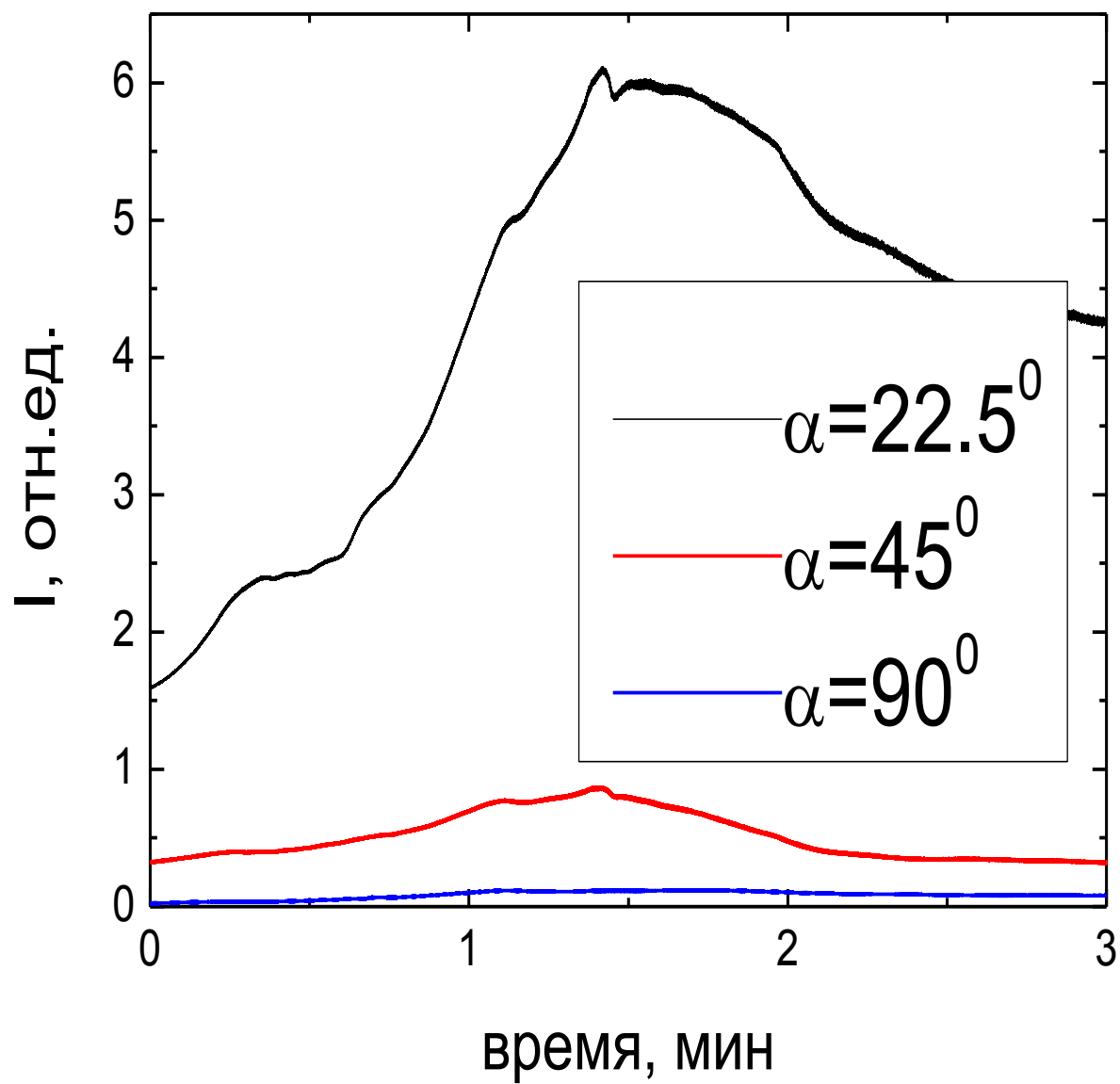


Рисунок 4.17 – Интенсивности рассеянного света лазерного излучения на трех разных углах, $W=10$ Вт, $p=0.5$ мбар

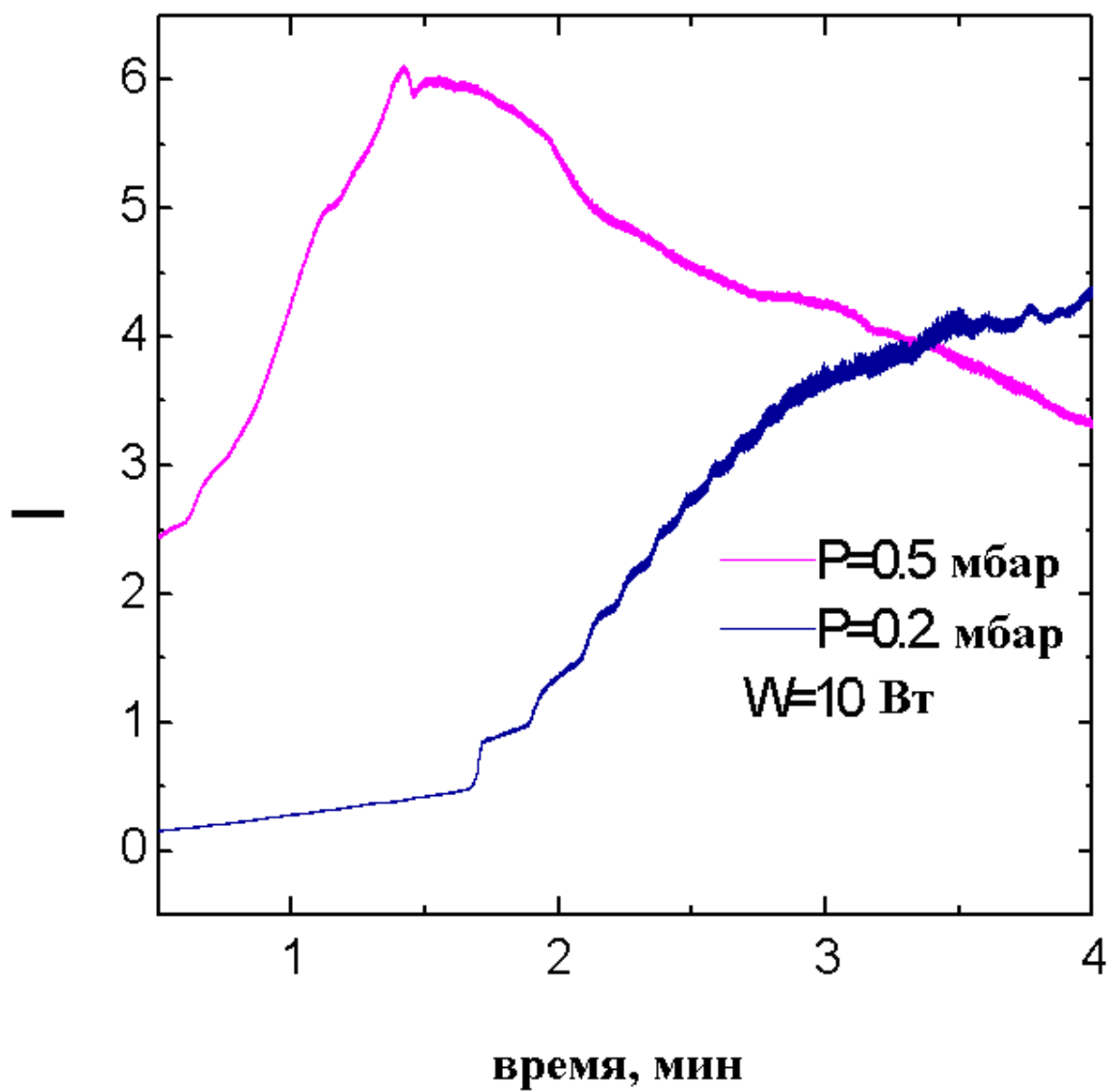


Рисунок 4.18 – Интенсивности рассеянного света лазерного излучения на угле 22.5° при $W=10$ Вт и разных давлениях

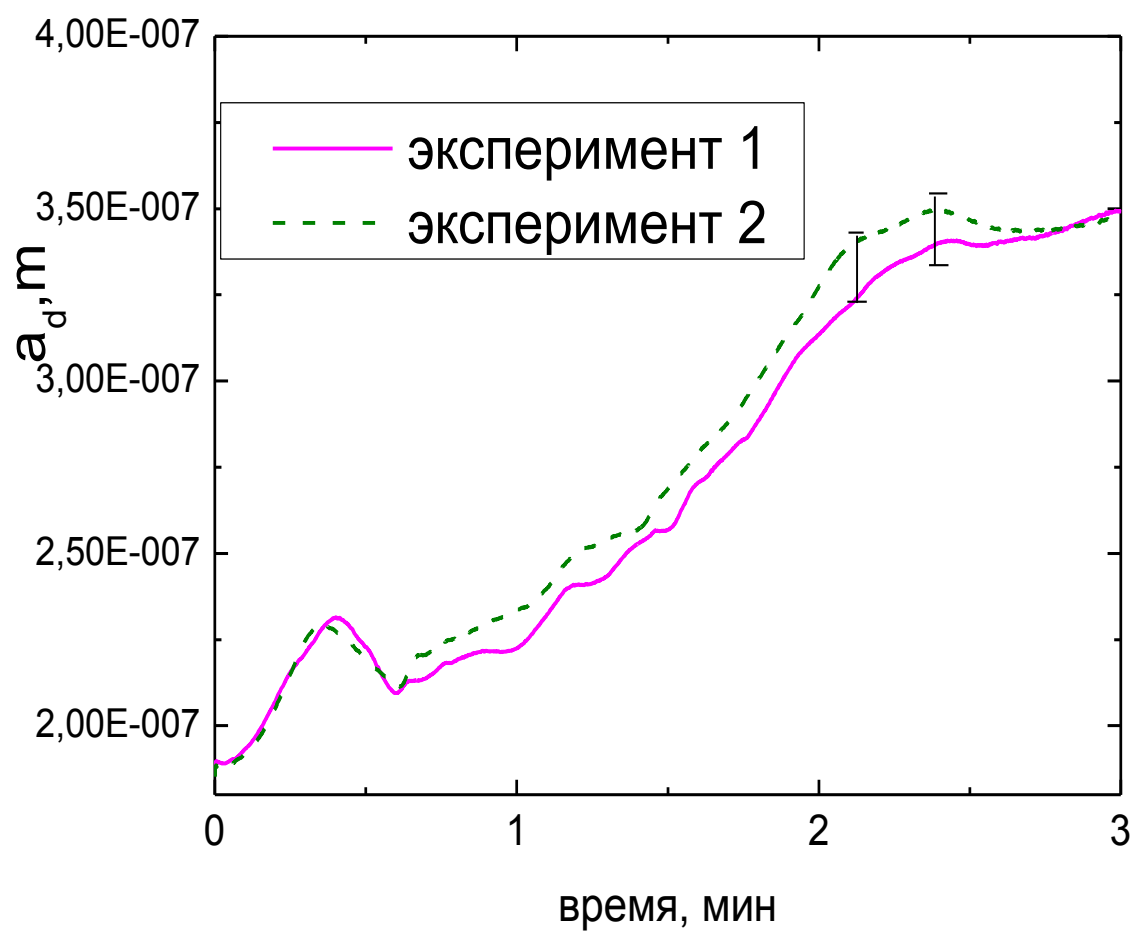


Рисунок 4.19 – Временная зависимость радиуса пылевых частиц при $W=10$ Вт и $p=0.5$ мбар

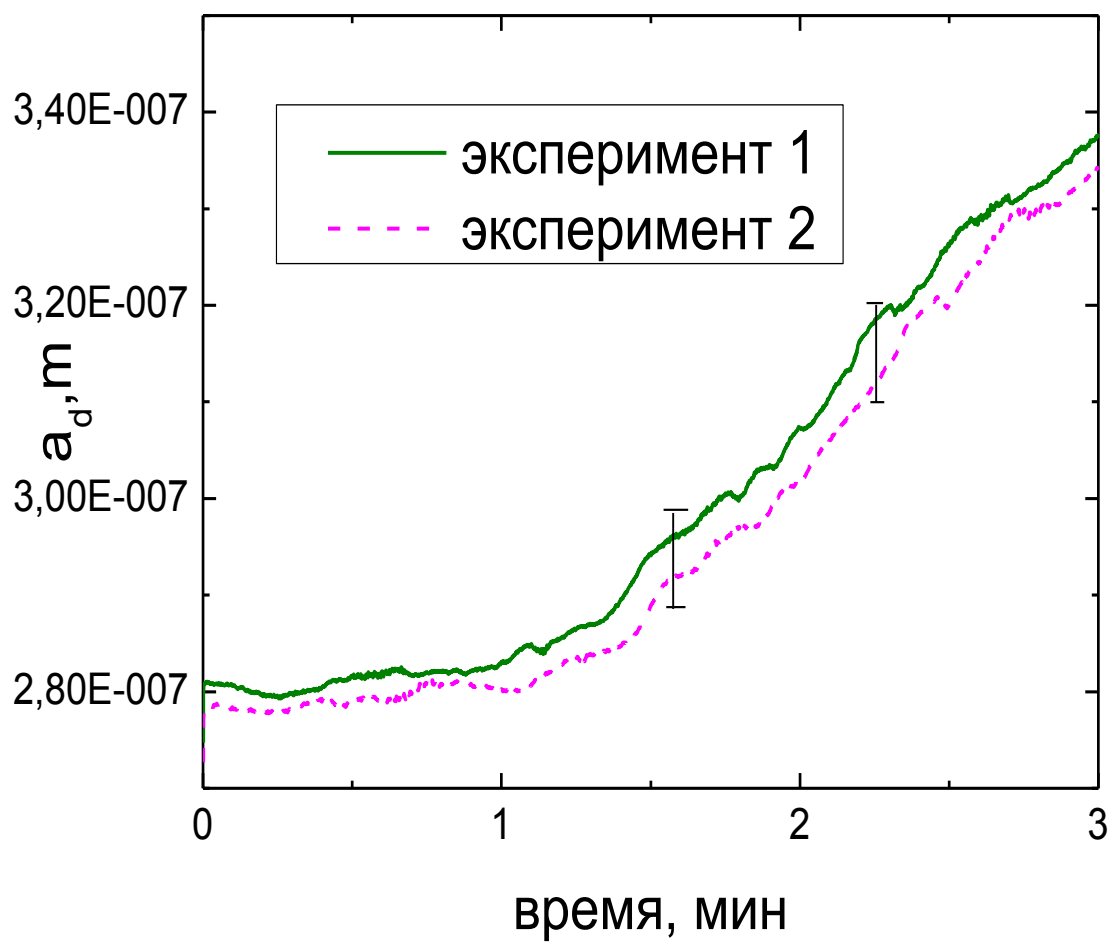


Рисунок 4.20 – Временная зависимость радиуса пылевых частиц при $W=7.5$ Вт и $p=0.5$ мбар

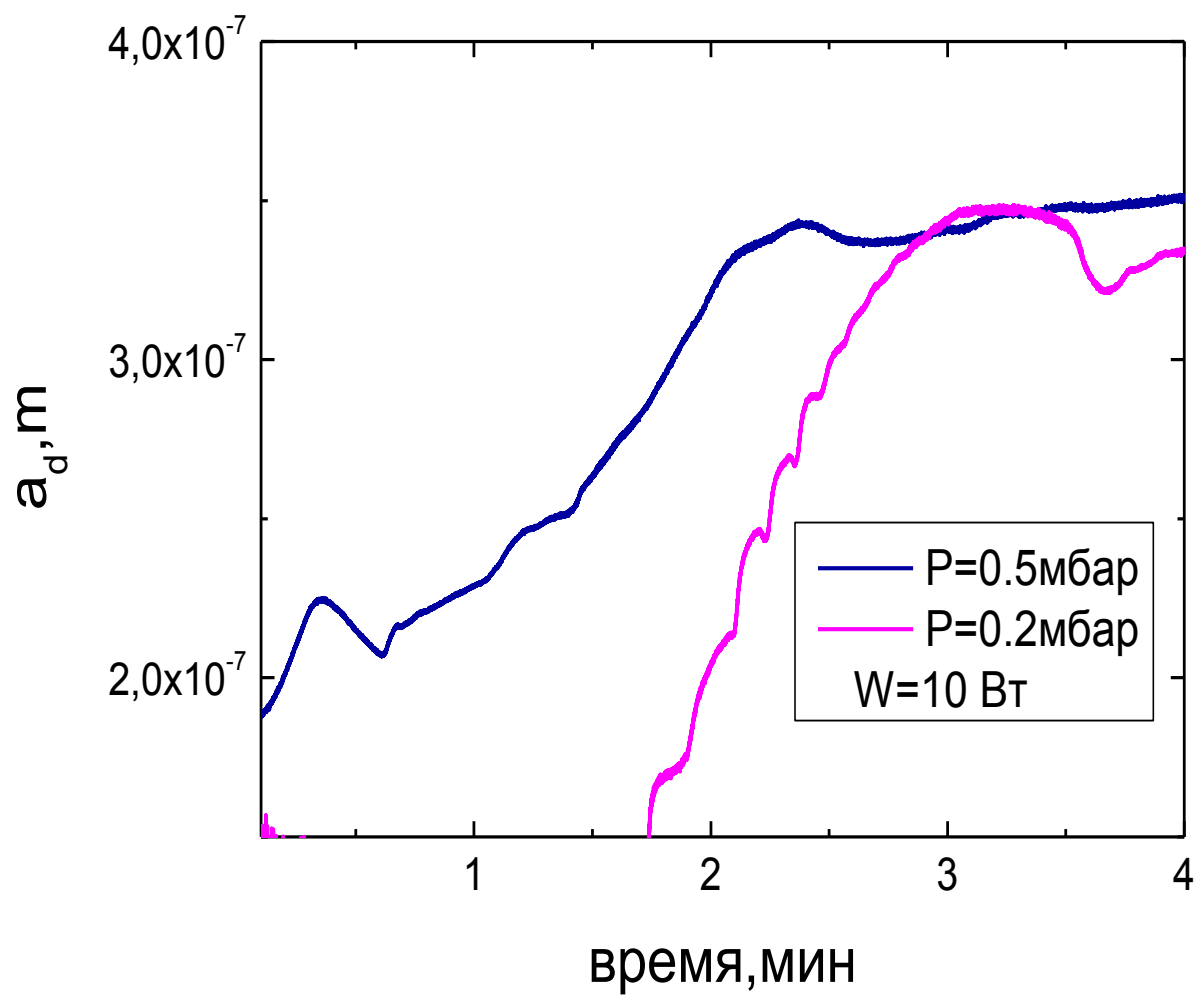


Рисунок 4.21 – Временная зависимость радиуса пылевых частиц при $W=10$ Вт и разных давлениях

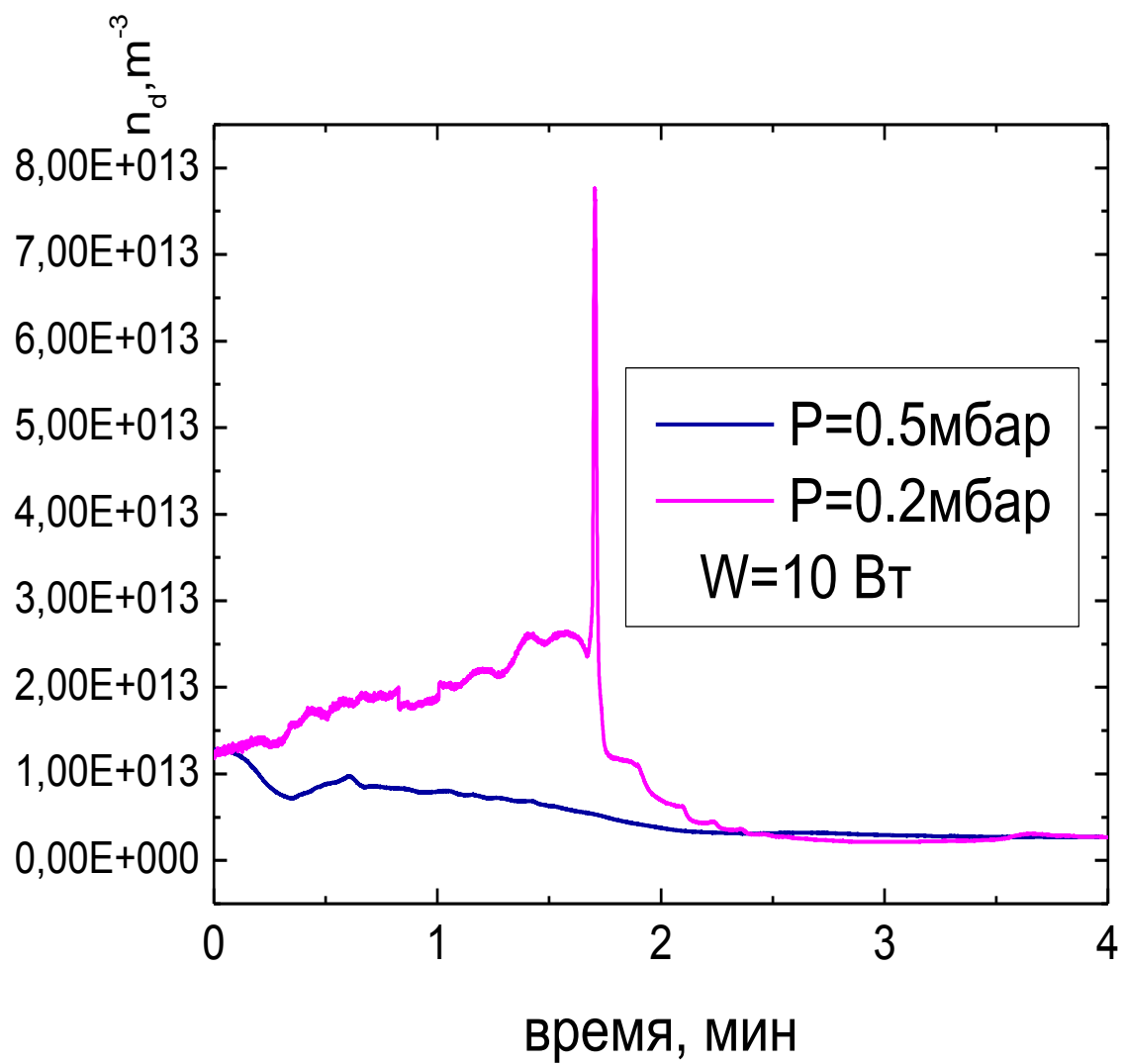


Рисунок 4.22 – Временная зависимость концентрации пылевых частиц при $W=10$ Вт и разных давлениях

4 RESEARCHES OF PROPERTIES OF RF DUSTY PLASMA WITH HELP OF MULTI-ANGLE SCATTERING

Before describing the experimental data and results we need to focus on Mie theory where we can calculate the light scattering characteristics with given parameters.

In MathLab the program had been written which calculates the cross sections of extinction (extinction efficiency), absorption and scattering, as well as many other scattering characteristics including the light scattering for given values of the wavelength of the incident light, the refractive index and the relative size of the spherical scattering particles (diffraction parameter).

On the experimental setup in Orlean University the set of experiments were carried out by multi-angle light scattering on dust formations in the plasma of RF discharge in a mixture of argon with acetylene (2%). Experiments were performed at different discharge parameters such as the pressure p [mbar] and the discharge power W [W]. Recording of data on the scattering intensities was carried out for a few minutes, but the basic research of this work focused in short times. In RF discharge with reactive gas the dust particles are formed and grow. The intensities of the scattered laser light at various angles were researched. It was observed that the scattered light intensity gradually increases, especially at the small angle 22.5° it indicates the presence of the forward scattering which is specific for relatively large particles. Presence of a maximum in the intensity curve indicates that these large particles reach a critical mass, when they cannot yet levitate by the help of electric field and fall down on the chamber bottom.

For the calculation of the size and concentration of dust particles the method based on the determination of the ratio of the intensities of the scattered light measured at two angles was used. With calculated size and chosen refractive index the written program based on the Mie theory is used to calculate the extinction cross section, which is necessary for determination of the concentration of the particles.

Experiments were carried out several times for each combination of parameters (pressure and discharge power). Results shows great repeatability and deviation does not exceed 10 %. Analysis of the obtained data showed that the growth of dust particles is more rapid with increasing of pressure.

4. RECHERCHES DES PROPRIETES DES PARTICULES A L'AIDE DE LA DIFFUSION MULTI – ANGLE.

Avant de décrire les données expérimentales et les résultats que nous en avons déduits nous devons tout d'abord nous concentrer sur la théorie de Mie qui nous permettra de calculer les caractéristiques de diffusion de la lumière à partir des données enregistrées.

Nous avons mis en œuvre un code de calcul, en langage MathLab, qui nous permet de calculer les sections efficaces d'extinction, d'absorption et de diffusion, ainsi que de nombreuses autres caractéristiques de la diffusion, y compris la diffusion de la lumière pour des valeurs données de la longueur d'onde de la lumière incidente, l'indice de réfraction et la taille moyenne des particules diffusantes sphériques (paramètres de diffraction).

Sur le dispositif expérimental de l'Université Orléans, plusieurs séries d'expériences ont été réalisées par diffusion de lumière multi-angles durant la formation des particules de poussière dans le plasma d'une décharge haute fréquence dans un mélange d'argon avec de l'acétylène (2%). Les expériences ont été effectuées à différents paramètres de la décharge, tels que la pression p [mbar] et la puissance [W]. L'enregistrement des données sur les intensités de diffusion a été effectué pendant quelques minutes, mais la recherche de base de ce travail a porté sur les premiers instants du mécanisme de formation. Les intensités de la lumière laser diffusée à des angles différents ont été étudiées. Il a été observé que l'intensité de la lumière diffusée augmente progressivement, en particulier aux petits angles ($22,50^\circ$), il indique la présence de la diffusion vers l'avant qui est spécifique pour des particules relativement grandes. La présence d'un maximum dans la courbe de l'intensité indique que ces grandes particules atteignent une taille critique, quand elles ne peuvent pas encore léviter grâce au champ électrique elles tombent au fond du réacteur.

Pour le calcul de la taille et la concentration des particules de poussière nous avons utilisé la méthode basée sur la détermination du rapport des intensités de la lumière diffusée à deux angles de mesure. Avec la taille calculée et l'indice de réfraction choisi le programme écrit sur la base de la théorie de Mie permet de calculer la section efficace d'extinction qui est nécessaire pour la détermination de la concentration des particules.

Des expériences ont été effectuées à plusieurs reprises pour chaque combinaison de paramètres (pression et puissance de décharge). Les résultats montrent une grande répétabilité et l'écart type ne dépasse pas 10 %. L'analyse des données obtenues a montré que la croissance des particules de poussière est plus rapide avec l'augmentation de la pression.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе проведено экспериментальное исследование структурных, динамических и оптических свойств неидеальной плазмы сложного состава, так называемой пылевой плазмы. По результатам диссертации можно сделать следующие выводы:

– На основе исследования структурных и динамических свойств пылевой плазмы на установке ВЧ разряда, показано, что бесконтактный метод диагностики с помощью видеозаписи плазменно-пылевых структур дает адекватное описание структурных и динамических свойств плазмы сложного состава. Замечено, несмотря на то, что с увеличением температуры пылевой плазмы, коэффициент диффузии пылевой компоненты растет, тем не менее, вследствие роста заряда пылинок (связи в системе), отношение коэффициента диффузии пылевой компоненты к значению коэффициента диффузии идеального газа уменьшается.

– Показано, что наличие пылевых частиц меняет интенсивность излучения спектральных линий буферной плазмы. При добавлении пылевых частиц микронных размеров наблюдается уменьшение интенсивности излучения спектральных линий аргона вследствие интенсивного поглощения быстрых электронов пылевой частицей микронных размеров.

– Создана экспериментальная установка по исследованию свойств пылевых образований в ВЧ разряде с помощью метода много углового рассеяния. Установка находится в лаборатории Орлеанского университета (Франция).

– Выполнены эксперименты по исследованию свойств пылевых образований в ВЧ установке с помощью метода много углового рассеяния. Данные по эволюции размеров и концентраций пылевых частиц, полученные в результате обработки экспериментальных данных показали высокий потенциал для развития данного метода. Приведены результаты вычислений характеристик рассеяния лазерного излучения на пылевых частицах, полученные в рамках Ми теории. Показано, что эксперимент и данные Ми теории демонстрируют наличие рассеяния вперед, характерного при формировании частиц размерами в сотни нанометров.

Таким образом, на основе проведенных в диссертационной работе исследований можно сделать заключение, о том, что на основе оптических методов фиксирования излучения плазмы или рассеянного света проходящего лазерного излучения, можно адекватно описать структурные, динамические и оптические свойства пылевой плазмы.

Поставленные задачи в диссертации полностью решены.

При решении поставленных задач в работе были использованы методы и подходы, отвечающие высокому научному уровню. Полученные результаты можно использовать как при теоретических расчетах, так и при проектировании и осуществлении различных экспериментальных проектов, связанных с неидеальной плазмой сложного состава. Например, в нано и микроэлектронике, в установках термоядерного синтеза.

Conclusion

In this thesis the experimental study of the structural, dynamic and optical properties of dusty plasma was carried out. According to the results of the dissertation the following conclusions can be made:

- Based on the study of structural and dynamic properties of dusty plasma on RF discharge setup, it is shown that non-invasive method of diagnostics via video records of dust structures provides an adequate description of the structural and dynamic properties of the dusty plasma. Observed that with the grows of temperature of the dusty plasma the diffusion coefficient of dust particles increases, however, due to the grows of charge of dust particles the ratio of the dust particles diffusion coefficient to the diffusion coefficient value of an ideal gas decreases.

- Shown that the presence of dust particles changes the intensity of spectral lines of the buffer plasma. Adding of micron-sized dust particles leads to decreasing of intensities of the spectral lines of argon due to intense absorption of electrons by dust particles of micron size.

- The experimental setup for study the properties of dust structures in RF discharge by the multi-angle scattering method was created. Installation is in the laboratory of GREMI of University of Orleans (France).

- The experiments on study of properties of dust formation in the RF discharge using the multi-angle scattering were implemented. The data on the evolution of the size and concentration of dust particles resulting from the processing of the experimental data showed a high potential for the development of this method. Presented the results of calculations of characteristics of scattered light on dust particles structures obtained in the framework of the Mie theory. It is shown that the experiment and the data of MI theory demonstrate the presence of scattering forward which is typical for the formation of particles with sizes of hundreds of nanometers.

Thus, based on thesis research, we can conclude that based on optical methods of registration of plasma emission or scattered light we can adequately describe the structural, dynamic and optical properties of dusty plasma.

Tasks in the thesis have been fully solved.

In solving the problems in the work we used the methods and approaches that meet high scientific level. The results obtained can be used as the theoretical calculations and as the design and implementation of various experiment projects related to dusty plasma. For example in nano and microelectronics and in nuclear fusion plants.

CONCLUSION

Dans cette thèse, l'étude expérimentale des propriétés structurales, dynamiques et optiques d'un plasma poussiéreux a été réalisée. Selon les résultats décrits dans ce manuscrit, les conclusions suivantes peuvent être formulées:

- Sur la base de l'étude des propriétés structurales et dynamiques du plasma poussiéreux dans une décharge RF, il est montré que la méthode non invasive de diagnostic par l'intermédiaire d'enregistrements vidéo de structures de particules de poussière fournit une description adéquate des propriétés structurales et dynamiques du nuage. Nous avons observé qu'avec l'augmentation de la température du plasma poussiéreux le coefficient de diffusion des particules de poussière augmente, cependant, en raison de l'augmentation de la charge des particules de poussière, le rapport du coefficient de diffusion des particules de poussière à la valeur de coefficient de diffusion dans un gaz parfait diminue.
- On voit que la présence de particules de poussière modifie l'intensité des raies spectrales du plasma dans le gaz tampon. L'ajout de particules de poussière de taille micronique conduit à la diminution des intensités des raies spectrales de l'argon due au fort attachement électronique par les particules.
- Le dispositif expérimental pour l'étude des propriétés des structures de poussières en décharge RF par la méthode de diffusion multi- angle a été mis en œuvre. L'installation est dans le laboratoire du GREMI de l'Université d'Orléans (France).
- Les expériences sur l'étude des mécanismes de formation de poussière dans une décharge RF à l'aide de la diffusion multi-angle ont été mises en œuvre. Les données relatives à l'évolution de la taille et la concentration des particules de poussière résultant du traitement des données expérimentales ont montré un fort potentiel pour le développement de cette méthode. Nous avons présenté les résultats des calculs des caractéristiques de la lumière diffusée sur les particules de poussière obtenues dans le cadre de la théorie de Mie. On montre que l'expérience et les données de la théorie Mie font apparaître la présence de la diffusion vers l'avant qui est typique pour la formation de particules dont les tailles sont de plusieurs centaines de nanomètres.

Ainsi, sur la base de travaux de recherche réalisés dans le cadre de cette thèse, nous pouvons conclure que en se basant sur des méthodes optiques d'enregistrement de l'émission de plasma ou de la lumière diffusée, nous pouvons décrire de manière adéquate les propriétés structurales, dynamiques et optiques de plasma poussiéreux.

Les objectifs fixés pour ce travail de thèse ont été entièrement atteints.

Afin de réaliser ces objectifs, nous avons utilisé des méthodes et des approches qui sont d'un haut niveau scientifique. Les résultats obtenus peuvent être utilisés pour des calculs théoriques, la conception et la mise en œuvre de divers projets expérimentaux liés aux plasmas poussiéreux comme, par exemple, en nano et micro-électronique et dans les installation de fusion thermonucléaire (Tokamaks).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Thomas H., Morfill G., Demmel V., Goree J., Feuerbacher B. and Mohlmann D. Plasma crystal: Coulomb crystallization in a dusty plasma // *Phys. Rev. Lett.* – 1994. – Vol.73. – P.652.
- 2 Chu J.H. and Lin I. Coulomb lattice in a weakly ionized colloidal plasma // *Physica A.* – 1994. – Vol. 205. - P.183.
- 3 Shukla P.K. and Mamun, A. A. Introduction to dusty plasma physics. Institute of physics publishing. - Bristol, UK, 2002. - P.265.
- 4 Sukhinin G.I., Fedoseev A.V., Ramazanov, T.S., Amangaliyeva R.Zh., Dosbalayev M.K. and Jumabekov A.N. Non-local effects in a stratified glow discharge with dust particles // *J. Phys. D: Appl. Phys.* – 2008. – Vol. 41. – P. 245207.
- 5 Fortov V.E., Nefedov A.P., Totchinski V.M. et al. Crystalline structures of strongly coupled dusty plasmas in dc glow discharge strata // *Phys. Lett. A.* – 1997. – Vol.229. – P.317.
- 6 Lipaev A.V., Molotkov V.I., Nefedov A.P., et al Ordered structures in a nonideal dusty glow – discharge plasma // *JETP.* – 1997. – Vol.85. – P.1110.
- 7 Tsytoich V. N. Dust plasma crystals, drops, and clouds // *Usp. Fiz. Nauk.* – 1997. – Vol. 167. – P.57.
- 8 Karasev V.Yu., Dzlieva E.S., Ivanov A.Yu. and Eikhvald A.I. Rotational motion of dusty structures in glow discharge in longitudinal magnetic field // *Phys. Rev. E.* – 2006. – Vol. 74. – P. 066403.
- 9 Vasiliev M.M., D'yachkov L.G., Antipov S.N., Huijink R., Petrov O.F. and Fortov V.E. Dynamics of dust structures in a dc discharge under action of axial magnetic field // *EPL.* – 2011. – Vol. 93. – P. 15001.
- 10 Ramazanov T.S., Kodanova S.K., Petrov O.F., Antipov S.N., Dzhumagulova K.N., Dosbolayev M.K. and Jumabekov A.N. An investigation of dust particles orbiting a Langmuir probe // *J. Phys. A: Math. Theor.* – 2009. - Vol. 42. - P. 214026.
- 11 Hayashi Y. and Tachibana K. // *Jpn. J. Appl. Phys.* – 1994. – Vol. 33, part 1. - P. 4208.
- 12 Boufendi L. and Bouchoule A. Particle nucleation and growth in a low – pressure argon-silane discharge // *Plasma Sources Sci. Technol.* – 1994. – Vol. 3. - P. 262.
- 13 Roca i Cabarrocas P., Gay P., Hadjadj A. Experimental evidence for nanoparticle deposition in continuous argon-silane plasmas: Effects of silicon on Im properties // *J. Vac. Sci. Technol.* - 1996. - № 14(A). – P.655.
- 14 Stoffels E., Stoffels W.W., Ceccone G., Rossi F. J. MoS₂ nanoparticle formation in a low pressure environment // *Appl. Phys.* – 1999. – P. 257.
- 15 Van de Hulst H.C. Light scattering by small particles // John Wiley & Sons. - New York, 1957. – P. 365.
- 16 Bohren C.F., Huffman D.R. Absorption and scattering of light by small particles. John Wiley & Sons. - New York, 1983. – P. 153.
- 17 Kerker M. The scattering of light and other electromagnetic radiation. - New York: Academic, 1969.

- 18 Courteille C., Hollenstein Ch., Dorier J.-L., Gay P., Schwarzenbach W., Howling A. A., Bertran E., Viera R., Martins G., Macarico A. Particle agglomeration study in rf silane plasmas: In situ study by polarization-sensitive laser light scattering // J. Appl. Phys. – 1994.- Vol. - 80 (4). – P. 2069- 2078.
- 19 Hollenstein C., Dorier J.-L., Dutta , Sansonnens L. and Howling A. A. Diagnostics of particle genesis and growth in RF silane plasmas by ion mass spectrometry and light scattering // Plasma sources Sci. Technol. – 1994. – Vol. 3. – P. 278.
- 20 Selwyn G. S., Heidenreich J. E. and Haller K. L. Rastered laser light scattering studies during plasma processing: particle contamination trapping phenomena // J. Vac. Sci. Technol. A – 1991. – Vol. 9. – P. 2817.
- 21 Schmidt U. I. and Graves D. B. // J. Vac. Sci. Technol. A. – 1996. - Vol.14. – P. 595.
- 22 Dorier J.-L., Hollenstein C. and Howling A. A. Spatio-temporal powder formation and trapping in RF Silane plasmas using 2-D polarization-sensitive laser scattering // J. Vac. Sci. Technol. A. – 1995. – Vol. 13. – P. 918.
- 23 Shiratani M., Kawasaki H., Fukuzawa T., Yoshioka T., Ueda Y., Singh S. and Watanabe Y. // J. Appl. Phys. – 1996. – Vol. 79. – P. 104.
- 24 Mie G. // Ann. Phys. – 1908. – Vol. 25. – P. 377.
- 25 Sitenko A. G., Zagorodny A. G. and Tsytovich V. N. // AIP Conf. Proc. – 1995. – Vol. 345. – P. 311.
- 26 Bingham R., Resendes D. P. and Tsytovich V. N. Dust plasma interaction in space. - New York: Nova Science Publishers, 2002.
- 27 D'Angelo N. Coulomb solids and low-frequency fluctuations in RF dusty plasmas // J. Phys. D. – 1995. – Vol. 28. – P. 1009.
- 28 Havnes O., Li F., Melandso F., Aslaksen T., Hartquist T. W., Morfill G. E., Nitter T. and Tsytovich V. Diagnostic of dusty plasma conditions by the observation of mach cones caused by dust acoustic waves // J. Vac. Sci. Technol. A. – 1996. – Vol. 14. – P. 525.
- 29 Howling A.A., Hollenstein Ch., Paris P. Direct visual observation of powder dynamics in rf plasma-assisted deposition // J. Appl. Phys. Lett. – 1991. - № 59. – P. 1409-1411.
- 30 Shiratani M., Kawasaki H., Fukuzawa T., Watanabe Y. // J. Vac. Sci. Technol. - 1996. № 14(A). – P.603.
- 31 Maiorov S.A., Ramazanov T.S., Dzhumagulova K.N., Dosbolayev A.N., Jumabekov A.N. Investigation of plasma-dust structures in He-Ar gas mixture // Phys. Plasmas. -2008.- Vol. 15. – P. 093701
- 32 Ramazanov T.S., Dzhumagulova K.N., Dosbolayev M.K., Jumabekov A. N. Structural properties of dusty plasma in direct current and radio frequency gas discharges // Phys. Plasmas. -2008.- Vol. 15. – P. 053704
- 33 Fortov V.E., Vaulina O.S., Petrov O.F., Molotkov V.I. transport of microparticles in eakly ionized gas-discharge plasmas under microgravity conditions // Phys. Rev.Lett. – 2003. - Vol.90. - P. 24

- 34 Nefedov A. P., Vaulina O. S., Petrov O. F., Molotkov V.I. The dynamics of macroparticles in a direct current glow discharge plasma under micro-gravity conditions // *New Journal of Physics*. – 2003. – Vol.5. – P. 108.1–108.11
- 35 Vaulina O.S., Vladimirov S.V.. Diffusion and dynamics of macro-particles in a complex plasmas // *Phys. Plasmas* . - 2002. -Vol.9. – P.3.
- 36 Kalman G. J., Hartmann P., Donkó Z., Rosenberg M. Two-Dimensional Yukawa Liquids: Correlation and Dynamics // *Phys. Rev. Lett.* – 2004. –Vol. 92. - P.6.
- 37 Kovács Zs., Hartmann P., Donkó Z. Dynamic Shear Viscosity in a 2D Yukawa System // *Contrib. Plasma Phys.* – 2012.-Vol. 52. – P.199.
- 38 Ohta H. and Hamaguchi S. Molecular dynamics evaluation of self – diffusion in Yukawa systems // *Physics of Plasmas*. – 2000. – Vol. 7. - P. 11
- 39 Ваулина О.С., Петров О.Ф., Фортон В.Е., Чернышев А.В., Гавриков А.В.и др. Экспериментальные исследования динамики макрочастиц в плазме газовых разрядов // *Физика плазмы*. - 2003. - Т.29, №8. - С. 698.
- 40 Viera, G., Huet, S., Bertran, E., Boufendi, L. Polymorphous Si thin films from radio frequency plasmas of SiH₄ diluted in Ar: A study by transmission electron microscopy and Raman spectroscopy // *Journal of Applied Physics*. – 2001. - Vol. 90. - P. 4272 – 4280.
- 41 Cavarroc M., Mikikian M., Perrier G., Boufendi L. Single-crystal silicon nanoparticles: An instability to check their synthesis // *Applied Physics Letters* – 2006. - Vol. 89. - P. 013107.
- 42 Fridman A.A., Boufendi L., Hbid T., Potapkin B.V., Bouchoule A. Dusty plasma formation: Physics and critical phenomena. Theoretical approach // *Journal of Applied Physics* – 1996. - Vol. 79. - P. 1303 – 1314.
- 43 Berndt J., Kovacevic E., Stefanovic I., Boufendi L. Controlled dust formation in pulsed rf plasmas // *Journal of Applied Physics*. – 2009. - Vol. 106. - P. 063309.
- 44 Рамазанов Т.С., Джумагулова К.Н., Досболаев М.К., Джумабеков А.Н., Петров О.Ф., Гавриков А.В., Стаценко К.Б. Плазменные-пылевые структуры в ВЧ-разряде // *Материалы Всероссийской (с международным участием) научной конференции по физике низкотемпературной плазмы (ФНТП)*. - Петрозаводск, 2007. - Т. 2. - С. 200 - 202.
- 45 Ramazanov T.S., Dzhumagulova K.N., Jumabekov A.N. and Dosbolayev M.K. Structural properties of dusty plasma in direct current and radio frequency gas discharges // *Phys. Plasmas* – 2008. –Vol.15. – P. 053704.
- 46 Ramazanov T.S., Jumabekov A.N., Orazbayev S.A., Dosbolayev M.K. and Jumagulov M. N. Optical and kinetic properties of the dusty plasma in rf discharge // *Phys. Plasmas* – 2012. - Vol.19. – P. 023706.
- 47 Рамазанов Т.С., Джумагулов М.Н., Буфенди Л. Исследование свойств пылевой плазмы высокочастотного разряда с помощью много углового рассеяния света // *Сборник трудов 8-ой Международной конференции СДФФФО*. –Алматы, 2013. – С.130-131.

48 Ваулина О.С., Петров О.Ф., Фортов В.Е., Чернышев А.В., Гавриков А.В., Шахова И.А., Семенов Ю.П. Экспериментальные исследования динамики частиц в плазме газовых разрядов // Физика Плазмы. - 2003.- Т.29, №8. - С.698-713.

49 Бульба А.В., Луизова Л.А., Пискунов А.А., Соловьев А.В. Исследование структуры плазменно-пылевых образований // ФНТП. - 2007. - Т. 2.- С. 214.

50 Джумабеков А.Н., Данияров Т.Т., Досболаев М.К., Джумагулов М.Н., Ибраимов К.М., Коданова С.К., Оразбаев С.А., Ажаронк В.В., Филатова И.И., Рамазанов Т.С. Исследования оптических свойств пылевой плазмы в высокочастотном емкостном разряде аргона // Вестник КазНУ, Серия физическая. – 2009. - №1(28). - С. 3-7.

51 Daniyarov T.T., Ramazanov T.S., Baimbetov F.B., Zhumanov K.B., Jumabekov A.N., Dosbolayev M.K., Jumagulov M.N., Kodanova S.K., Orazbaev S.A., Azharonok V.V., Filatova I.I., Krat'ko L.E. Investigation of optical properties of dusty plasma in capacitive radio frequency discharge of argon // Plasma Physics and Plasma Technology, Minsk. - 2009. - Vol.2.- P. 788-791.

52 Hayashi Y. and Tachibana K. Observation of coulomb crystal formation from carbon particles grown in a methane plasma // Jpn. J. Appl. Phys. - 1994. - Vol. 33. – P. 804.

53 Maiorov S.A., Ramazanov T.S., Dzhumagulova K.N., Jumabekov A.N. and Dosbolayev M.K. Investigation of plasma – dust structures in He-Ar gas mixture // Phys. Plasmas – 2008. - Vol. 15. – P. 093701.

54 Gavrikov A.V., Shakhova I.A., Vaulina O.S., Petrov O.F. and Fortov V.E. Study of Diffusion Coefficient and Phase Transitions in Structures Formed by Dust Particles in RF-Discharge // Physica Scripta. – 2004. - Vol. 107. – P. 83.

55 Vaulina O.S., Nefedov A.P., Petrov O.F. and Fortov V.E. Diffusion in microgravity of macroparticles in a dusty plasma under solar radiation // Phys. Rev. Lett. - 2002. – Vol. 88. – P. 035001.

56 Fortov V.E., Vaulina O.S., Petrov O.F., Molotkov V.I., Lipaev A.M. and Torchinsky V.M. Transport of microparticles in weakly ionized gas-discharge plasmas under microgravity conditions// Phys. Rev. Lett.- 2003. – Vol. 90. – P. 245005.

57 Vaulina, O.S., Adamovich X.G., Petrov, O.F.; Fortov, V.E. Evolution of the mass-transfer processes in nonideal dissipative systems. I. Numerical simulation // Phys.Rev. E. – 2008. – Vol. 77. – P. 066403.

58 Vaulina O.S., Khrapak S. and Morfill G.E. Universal scaling in complex (dusty) plasmas // Phys. Rev. E. – 2002. – Vol. 66. - P. 016 404.

59 Зайдель А. Н., Калитеевский Н. И., Липис Л. В., Чайка М. П. Эмиссионный спектральный анализ атомных материалов. Москва: Физматгиз, 1960.- С. 229.

60 Оразбаев С.А., Джумагулов М.Н. Оптико-спектроскопическая диагностика пылевой плазмы в ВЧ разряде. // Сборник тезисов Международной конференции студентов и молодых ученых «Мир науки». – 2011. - С.146.

61 Orazbayev S.A., Jumagulov M.N., Dosbolayev M.K., Silamiya M., Ramazanov T.S., Boufendi L. Optical spectroscopic diagnostics of dusty plasma in RF discharge // Book of abstracts ICPDP-6, Germany, 2011. - P.186.

62 Джумагулов М.Н., Оразбаев С.А., Досболаев М.К., Сламия М., Рамазанов Т.С., Боуфенди Л. Оптико-спектроскопическая диагностика пылевой плазмы в ВЧ разряде в смеси газов // Международная конференция «Современные достижения физики и фундаментальное физическое образование». - Алматы, 2011. - С.54-55.

63 Оразбаев С.А., Джумагулов М.Н., Сламия М., Досболаев М.Қ., Жуманов К.Б., Рамазанов Т.С., Боуфенди Л. Спектрлердің абсолют интенсивтілігі әдісін тозаңды плазма құрамын зерттеуде қолдану // Международная конференция «Современные достижения физики и фундаментальное физическое образование». - Алматы, 2011. - С. 65-67.

64 Оразбаев С.А., Джумагулов М.Н., Досболаев М.Қ., Сламия М., Рамазанов Т.С. Оптико-спектроскопическая диагностика пылевой плазмы в ВЧ разряде // Известия НАН РК, серия физико-математическая. – 2011. - № 3(277). - С. 47 – 51.

65 Massereau-Guilbaud V., Géraud-Grenier I. and Plain A. Determination of the electron temperature by optical emission spectroscopy in a 13.56 MHz dusty methane plasma: Influence of the power// J. Appl. Phys. – 2009. - Vol. 106. - P. 113305.

66 Antonova T., Annaratone B.M., Allen J.E., Sato T., Thomas H.M. and Morfill G.E. Study of the 3D plasma cluster environment by emission spectroscopy // New Journal of Physics. – 2009. – Vol. 11. - P. 113023.

67 Mitic S., Klumov V.A., Pustyl'nik M.Y. and Morfill G.E. Determination of electron temperature in low-pressure plasmas by means of optical emission spectroscopy // JETP. – 2010. – Vol. 91. -P. 249.

68 Сламия М., Оразбаев С.А., Жұмағұлов М.Н., Қабылқак М., Жұмабеков А.Н., Досболаев М.Қ., Рамазанов Т.С. Жоғары жиілікті сыйымдылықты разрядтағы тозаңды плазманың концентрациясының жарық интенсивтілігіне әсерін зерттеу // Вестник КазНУ, серия физическая. – 2012. - №1(40). - С. 24-27.

69 Orazbayev S.A., Ramazanov T.S., Dosbolayev M.K., Silamiya M., Jumagulov M.N. Spectroscopic diagnostics of plasma gas mixtures in radio frequency discharge // Book of Abstracts of PNP -14, Germany, 2012. - P.152-153.

70 Orazbayev S.A., Muratov M.M., Ramazanov T.S., Jumagulov M.N., Dosbolayev M.K., Silamiya M. and Boufendi L. The Diagnostics of dusty plasma in rf discharge by two different methods // Contrib. Plasma Phys. – 2013. – Vol. 53. – P.436 – 441.

71 Bouchoule A. and Boufendi L. Particulate formation and dusty plasma behaviour in argon-silane RF discharge // Plasmasources Sci. Technol. – 1993. – Vol. 2. - P. 204.

72 Bouchoule A. and Boufendi L. Proc. of nato advanced research workshop plasma // Plasmasources Sci. Technol. - 1993. – Vol. 3. – P. 292.

73 Орлов Л.Н., Ажаронок В.В. // Журн. прикл. спектр. - 1997 – Т. 66. – С. 715.

74 Ажаронок В.В., И.И. Филатова, Шиманович В.Д., Орлов Л.Н. Газокинетическая температура плазмы планарного высокочастотного емкостного разряда в газовых смесях N[2]/CO[2]/He // J. Appl. Spectroscopy . - 2002. - Vol. 69, №5. – P. 658.

75 Райзер Ю.П., Шнейдер М.Н., Яценко Н.А. Высокочастотный емкостной разряд. М., 1995 –С.320.

76 Райзер Ю.П. Основы современной физики газоразрядных процессов. М.: Наука, 1980 – С.416.

77 Land V. and Goedheer W.J. The plasma inside a dust free void: hotter, denser, or both? // New J. Phys. – 2007. – Vol. 9. - P. 246.

78 Mitic S., Pustynnik M.Y. and Morfill G.E. Spectroscopic evaluation of the effect of the microparticles on radiofrequency argon plasma // New J. Phys. – 2009. - Vol. 11. – P. 083020.

79 De Zhen Wang and Dong J.Q. Kinetics of low pressure RF discharges with dust particles // J.Appl.Phys. – 1997. - Vol. 81. – P. 38.

80 Chloé Caumont-Prim, Jérôme Yon, Alexis Coppalle, François-Xavier Ouf, Kuan Fang Ren Measurement of aggregates' size distribution by angular light scattering // Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. – 2013. - Vol. 126. - P. 140-149.

81 Dobbins R.A., Magaridis C.M. Absorption and scattering of light by polydisperse aggregates // Appl. Opt. – 1991. - Vol. 30 - P.4747-54.

82 Sorensen C.M. Light scattering by fractal aggregates: a review // Aerosol Sci. Sci. Technol. – 2001. – Vol. 35(2). - P.648-87.

83 Sorensen C.M. The mobility of fractal aggregates: a review // Aerosol Sci. Sci. Technol. – 2011. - Vol. 45(7). - P.765-79.